

**Tielaitos**

**Matti Huhtala, Reijo Orama, Veikko Miettinen, Jari Pihlajamäki  
Antti Ruotoistenmäki**

## **Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1992 - 1993**

Roudan sulamisen simulointi, pohjaveden pinnan vaikutus  
korkeassa lämpötilassa, päällysteen reunan vaikutus

**Tielaitoksen  
selvityksiä**

**12/1994**

Helsinki 1994

**Geokeskus  
VTT/YKI**

# Tielaitoksen selvityksiä 12/1994

**Matti Huhtala, Reijo Orama, Veikko Miettinen, Jari Pihlajamäki  
Antti Ruotoistenmäki**

## **Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1992 - 1993**

Roudan sulamisen simulointi, pohjaveden pinnan vaikutus  
korkeassa lämpötilassa, päällysteen reunan vaikutus

1466



**Tielaitos  
Geokeskus  
VTT/YKI**

Helsinki 1994



ISSN 0788-3722  
ISBN 951-47-8748-X  
TIEL 3200223  
Painatuskeskus Oy  
Helsinki 1994

Julkaisua kustannus ja myynti:  
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,  
painotuotepalvelut  
Telefax (90) 1487 2652



**Tielaitos**  
Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puh. vaihde (90) 148 721

**HUHTALA Matti, ORAMA Reijo, MIETTINEN Veikko, PIHLAJAMÄKI Jari, RUOTOISTENMÄKI Antti: Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1992-1993.** Roudan sulamisen simulointi, pohjaveden pinnan vaikutus korkeassa lämpötilassa, päällysteen reunan vaikutus. Helsinki 1994, Tielaitos, Geokeskus. Tielaitoksen selvityksiä 12/1994, 72 s.+liitt., ISBN 951-47-8748-X, ISSN 0788-3722, TIEL 3200223

**Avainsanat** dynaaminen kuormitus, muodonmuutokset, jännitykset, taipumat, mittaukset, pohjavesi, pudotuspainolaite, takaisinlaskenta, muodonmuutosmoduuli, routa, sulamispehmeneminen, huokospaine

## **Tiivistelmä**

VTT:n tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio on kehittänyt vuodesta 1980 lähtien TIEL:n geokeskuksen toimeksiannosta tierasitusten mittauslaitteita. VTT/TGL on tehnyt sekä asfalttipäällysteen venymä-, taipuma ja pintapaineantureita että sitomattomien kerrosten paineantureita. Lisäksi kuormaauton akseleille on asennettu venymäantureita ja auton eri osiin kiihtyvyyssantureita.

Mittausten avulla voidaan selvittää liikkuvan pyörän kuormittaman tierakenteen käyttäytymistä. Tietoja voidaan käyttää erilaisten renkaiden ja akselistojen vaikutuksen vertailuun sekä tierakenteen mitoitus- ja vahvistamismenetelmien kehittämiseen.

Vuonna 1983 rakennettiin Virttaan varalaskupaikalle mittauskenttä, jota laajennettiin vuonna 1987. Kentän asfalttipäällysteeseen on instrumentoitu venymäanturit, sitomattomiin kerroksiin paineanturit ja tienpintaan taipumaanturit. Kesällä 1990 rakennettiin Virttaalle uusi vastaavasti instrumentoitu mittauskenttä, jossa on viisi 10 m:n pituista koerakennetta. Rakenteista kolme on tehty altaaseen, jossa pohjaveden pinnan korkeutta voidaan säädellä. Kaksi rakennetta on altaan ulkopuolella käytettävissä vertailumittauksiin. Vesialtaassa olevat rakenteet ovat paksu ja ohut asfalttibetonirakenne sekä maabetonirakenne.

Tässä raportissa selvitetään vuosien 1992-1993 mittauksia. Tutkittavana oli roudan sulamisen simulointi ja kuormituksen aiheuttamien tierasitusten mittaaminen roudan sulamisen eri vaiheissa. Pohjaveden tason vaikutusta pyöräkuorman aiheuttamiin tierasituksiin tutkittiin korkeassa lämpötilassa. Tien reunan vaikutusta kuormituksen aiheuttamiin päällysteen muodonmuutoksiin selvitettiin.

Tutkimussarjasta on tehty tähän mennessä kaksikymmentäyksi raporttia.

**HUHTALA Matti, ORAMA Reijo, MIETTINEN Veikko, PIHLAJAMÄKI Jari, RUOTOISTENMÄKI Antti: Stress and strain measurements in pavements 1992 - 1993.** Thawing simulation, the effect of water table level at high temperatures and the effect if road edge.  
Helsinki 1994, Finnish National Road Administration. Geotechnology. FinnRA Reports 12/1994, 72 p.+ enclosures, ISBN 951-47-8748-X, ISSN 0788-3722, TIEL 3200223

**Keywords** dynamic loading, response, strain, deflection, stress, measurements, water table level, layer modulus, falling weight deflectometer, FWD, backcalculation, freeze, thaw, pore pressure

## **Abstract**

Road-, Traffic-, and Geotechnical laboratory (TGL) of Technical Research Centre of Finland (VTT) has been developing pavement instrumentation and carrying out field measurements at an instrumented pavement section since 1980, commissioned by the Finnish Road Administration (FinnRA). VTT/TGL has built strain gauges and deflection rods for bituminous layers, devices to measure contact stress between the tyre and the pavement and pressure cells for unbound granular layers. In addition, strain gauges and acceleration sensors have been installed onto truck axles.

The results are used for comparison of the effect of different tyres and axle configurations on pavement behaviour and for development of pavement design and rehabilitation methods.

In 1983, first instrumented pavement section was built at the Virttaa emergency landing area on main road 41. The pavement section used in this study with five test structures is illustrated in figure 1. The length of each test structure is 10 meters. Three of the five structures have been built into a pool with the ability to control the ground water table level. Structures in the pool are thick and thin asphalt concrete structure and one soil cement structure.

Measurements for this study were carried out during 1992-93. Objectives of this study were to simulate spring thaw period and to measure stresses, strains and displacements induced by the moving wheel load during the thawing process at different ground water table levels. The effect of ground water table level on response in high temperatures was studied. In-situ layer moduli were determined using the falling weight deflectometer (FWD). Strains and deflections calculated with linear elastic multilayer program using the backcalculated layer moduli were compared with the measured values. The effect of pavement edge on strains in the bituminous layer was investigated. In addition, pore pressure induced by dynamic loading was measured.

It was found, that in early stage of spring thaw, the structure is so stiff, that changes in water table level have little effect on measured stresses, strains and displacements (figures 7-9). At a later stage of spring thaw, asphalt strain is decreased when unbound granular layer above frozen layer is completely saturated, compared to that when the unbound layer is dry (figure 10).



Similarly, deflections and stresses are increased (figures 11 and 12). In high temperatures, changes in water table level had little effect on pavement response (figures 32-34).

In-situ layer moduli determined using the FWD are at the level of present design values. The effect of water table level and stress level is seen in the backcalculated layer moduli (figures 13-16, 24-27 and 38-42). The effect of frozen layer is also seen in the results. Variation in the thickness and moisture content of the frozen layer cause variation in the backcalculated layer moduli. Variation in measurements during summer is very small (appendices 2-4).

Strains calculated from FWD tests with two methods, linear elastic program (BISAR) and Boussinesq's equations using method of equivalent thicknesses (Elmod-program), correlate with each other. Measured strains are somewhat greater than calculated strains, which may be due to several reasons: effect of dynamic axle loads on measured strains, and linear and static analysis of non-linear materials under dynamic loading may overestimate layer moduli and thus cause decrease in calculated strain (see figures 43-47 and appendices 5-7).

Deflections measured with the FWD are greater than the deflections measured with the deflection rod, which extend to the depth of 1,3 meters (see figures 48-50 and appendices 5-7).

Measured and calculated stresses correlate best in structures with thick bituminous layers (figure 51). In soil cement structures and structures with thin bituminous layers, measured stresses are greater than calculated stresses (figure 52).

Strains in the bottom of bituminous layer were expected to increase near the pavement edge. The results were the opposite. This is concluded to follow from that the test structure is bounded by a ten-meter wide soil-cement shoulder.

Pore pressure induced by the moving wheel load was found to decrease rapidly with increasing depth and lowering of water table level (table 1 and figures 54 and 55).

## Esipuhe

Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio on pääosin Tielaitoksen tilaamana ja kustantamana kehittänyt mittauslaitteita, joilla voidaan mitata kuorma-auton tierakenteen eri osiin ja pohjamaahan aiheuttamia jännityksiä ja muodonmuutoksia.

Tutkimussarjan ensimmäisessä vaiheessa vuonna 1980 anturit asennettiin Otaniemessä olevaan koekuoppaan /1/. Vuodesta 1980 lähtien Otaniemen koekuopalla tehtiin alustavia mittauksia.

Seuraavassa vaiheessa vuonna 1983 tehtiin kantatie 41:llä olevalle Virtaan varalaskupaikalle laajempi mittauskenttä, jonka päällysteen alapintaan asennettiin venymäantureita ja sitomattomiin kerroksiin paineantureita kolmeen eri tasoon /2/.

Syksyllä 1983 tehtiin Virtaan mittauskentällä tutkimus, jossa verrattiin seitsemän erilaisen ajoneuvotyypin vaikutuksia tierakenteeseen /3/. Siitä tutkimuksesta saatujen kokemusten perusteella tehtiin syksyllä 1984 laaja tutkimus, jossa verrattiin 12 ajoneuvotyyppiä, joissa oli lähes kaikki silloin käytössä olleet rengas- ja akselistovaihtoehdot /4/.

Vuonna 1984 OECD:n tietutkimusryhmä I2 (Full Scale Pavement Tests) järjesti Italiassa Nardossa asfalttipäällysteiden muodonmuutosantureiden vertailukokeen. Tähän osallistui yhdeksän tutkimusryhmää kahdeksasta maasta, mm. VTT:n tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio tämän tutkimussarjan yhteydessä kehittämällään anturityypillä /5, 6/.

Mittauskenttää laajennettiin vuonna 1985. Tutkimuskohteena oli asfalttipäällysteen paksuuden ja lämpötilan vaikutus liikennekuorman tierakenteeseen aiheuttamiin muodonmuutoksiin ja jännityksiin. Esitutkimusluonteisena alettiin selvittää tien epätasaisuuden vaikutusta tierakenteeseen ja ajoneuvoon aiheutuviin dynaamisiin lisäkuormiin /7/.

Vuonna 1986 tehtiin edellisiä tutkimuksia täydentäviä mittauksia ja tutkittiin rengaspaineen vaikutusta tien rasittumiseen. Lisäksi asennettiin uusia venymäantureita asfalttipäällysteeseen sekä ylä- että alapintaan ja mittausuuntaan nähden sekä pitkittäin että poikittain. Uusien antureiden soveltuvuutta tutkittiin ja niiden avulla hankittiin lisätietoa tierakenteen käyttäytymisestä liikkuvan pyörän kuormittamana /8/.

Kesällä 1987 Virtaan mittauskenttä rakennettiin osittain uudelleen; kantava kerros ja päällyste uusittiin. Kenttä päällystettiin 60 m matkalta ja siihen tehtiin neljä koelohkoa, joiden päällystepaksuus oli 80 ja 160 mm. Tutkittavina asioina olivat kuormituksen aiheuttama jännitysjakautuma kantavassa kerroksessa sekä päällysteen eri osiin ja suuntiin aiheutuneet muodonmuutokset. Kuorma-auton akseleille liimattiin venymäliuskoja, joiden avulla selvitettiin dynaamisia akselipainoja. Näitä verrattiin Laser-tasaisuusmittarin antamiin tuloksiin /9/. Lisäksi tehtiin ruotsalaisen Transportforskningskommis-sionenin (TFK) toimeksiannosta laaja rengastyypin ja rengaspaineen vaikutusta tierasitukseen selvittävä tutkimus /10/.

Vuosina 1988 - 1989 selvitettiin renkaan ja tien välistä dynaamista pintapainetta, dynaamisia akselipainoja ja epätasaisuuden vaikutusta niihin sekä poikittaista muodonmuutosta /11/.

Vuosina 1989 - 1990 olivat tutkittavina asioina tienpinnan taipuman mittaus ja muodonmuutos päällysteessä eri suunnissa /12/.

OECD:n tietutkimustoiminnan puitteissa järjestettiin Ranskan tietutkimuslaitoksen LCPC:n koetiekoneella Nantes'issa yhteinen koe vuosina 1988 - 1990 (FORCE-projekti). Kokeen tarkoituksena oli selvittää tierakenteen vaurioitumis-malleja. Lisäksi osallistujamaat tekivät omilla pienemmillä radoillaan ns. satelliittikokeita. Suomella oli kokoonsa nähden suuri painoarvo kokeen johto- ja työryhmissä (Suonio, Kankare, Huhtala). Koe oli suurin tiealan kansainvälinen tutkimus tähän mennessä (SHRP kansallinen, avoin).

LCPC:n koetiekone on maailman suurin. Radan halkaisija on 40 m, akselipaino 130 kN:iin saakka ja nopeus jopa 100 km/h. Rataan tehtiin syksyllä 1988 kolme koerakennetta, joista kaksi päällystettiin uudelleen kokeen kuluessa niiden rikkoonnuttua. Kuormitusajot lopetettiin marraskuussa 1989. Mittaus-tulokset analysoitiin vuoden 1990 loppuun mennessä. Kokeesta järjestettiin kansainvälinen konferenssi Ranskassa La Baulessa 15. - 17.5.1991 /13/.

TIEL:n kustantamana VTT:n tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio vastasi Suomen osuudesta. VTT/TGL asensi yhteisten antureiden lisäksi omia antureita ja teki Nantesiin neljä antureiden asennus- ja mittausmatkaa. Omien mittausten käsittelyn lisäksi VTT/TGL vastasi tärkeältä osalta yhteisen kokeen tulosten analysoinnista.



Suomen satelliittikoe tehtiin Neste Oy:n kantavuuskoeradalla Sköldvikissä. Koe tehtiin yhteistyössä TIEL:n, Neste Oy:n, Rakennusaineteollisuusyhdistys ry:n ja TGL:n kesken vuosina 1990-1992. Tutkittavina olivat vastaavat rakenteet kuin Nantes'issa, kuormitusparametrit määräytyivät koneen ominaisuuksien mukaan /14/.

Tämä tutkimusselostus sisältää vuosien 1992 - 1993 mittausten raportoinnin. Tutkittavina asioina olivat roudan sulamisen simulointi ja tierasitusten mittaaminen sulamisen aikana, pohjaveden pinnan tason vaikutus pyöräkuorman aiheuttamiin tierasituksiin korkeassa lämpötilassa ja tien reunan vaikutus.

TIEL:n puolesta tutkimusta ovat valvoneet ja ohjanneet apulaisjohtaja Tauno Hailikari (31.1.1992 saakka) ja ylitarkastaja Reijo Orama geokeskuksesta.

Tutkimuksen vastuuhenkilönä VTT/TGL:ssa on ollut dipl.ins. Jari Pihlajamäki. Projektin suunnitteluun on osallistunut tekn.lis. Matti Huhtala. Antureiden suunnittelusta ja rakentamisesta on huolehtinut pääasiassa fil.kand. Risto Alkio. Kenttämittauksista ja aineiston käsittelystä on vastannut Jari Pihlajamäki. Mittauksiin ja aineiston käsittelyyn ovat osallistuneet myös ins. Pekka Halonen, dipl.ins. Veikko Miettinen ja dipl.ins. Antti Ruotoistenmäki. Raportin ovat kirjoittaneet Jari Pihlajamäki, Veikko Miettinen ja Antti Ruotoistenmäki.

---

**Sisältö**

1	JOHDANTO	11
2	TUTKITTAVAT ASIAT	15
3	TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	22
3.1	Roudan simulointi	22
3.1.1	Kuormituksena auto	24
3.1.1.1	Maaliskuun mittaukset	24
3.1.1.2	Huhtikuun mittaukset	26
3.1.2	Kuormituksena pudotuspainolaite	28
3.1.2.1	Tehdyt mittaukset ja tulosten käsittelymenetelmät	28
3.1.2.2	Maaliskuun mittaukset	29
3.1.2.3	Huhtikuun mittaukset	36
3.2	Pohjaveden pinnan tason vaikutus tierasitukseen korkeassa lämpötilassa	41
3.2.1	Kuormituksena auto	42
3.2.2	Kuormituksena pudotuspainolaite	48
3.3	Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten välinen vertailu	51
3.4	Reunavaikutus	58
3.5	Huokosvedenpaineen mittaukset	59
4	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	62
5	KIRJALLISUUSLUETTELO	66
6	LIITTEET	72

---



## 1 JOHDANTO

Tietoa erilaisten kuorma-autojen aiheuttamista tierakenteen rasituksista tarvitaan tierakenteen mitoituksen lisäksi mm. kuorma-autokaluston valmistuksen ja valinnan ohjaamiseksi sellaiseksi, että tierakennetta ei tarpeettomasti rasitettaisi. Ohjauskeinoina ovat tutkimustulosten informointi, mitta- ja painomääräykset sekä verotus.

Tierakenteen mitoituksessa käytettävien erilaisten kuorma-autotyyppien vastaavuuskertoimien määrittämiseksi täytyy ensiksi mitata tiettyjen ominaisuuksien vaikutus. Tällaisia ovat erilaiset akselipainot, rengaspaineet, rengastyypit, yksittäiset pyörät, leveät pyörät ja paripyörät, yksittäiset akselit, telit ja telivälit sekä jousitus. Jousitusta selvitetään mittaamalla pyörillä esiintyviä dynaamisia rasituksia auton liikkuessa erilaisilla teillä. Muita tekijöitä tutkittaessa voidaan käyttää kolmea lähestymistapaa:

- täysimittaisia tiekokeita,
- teoreettisia laskelmia monikerros- tai elementtiohjelmilla,
- suoria kuorma-autojen tierakenteeseen aiheuttamien jännitysten ja muodonmuutosten kenttämittauksia.

Täysimittaisilla tiekokeilla tarkoitetaan sitä, että tierakennetta rasitetaan toistuvilla liikennekuormaa vastaavilla kuormilla niin kauan, että rakenne rikkoontuu. Kuormitus voidaan saada aikaan kuorma-autoilla, mikä on erittäin kallista (esim. AASHO-tiekoe) tai koetiekoneilla. Nämä soveltuvat kuitenkin lähinnä vain tierakenteiden tutkimiseen, sillä pyörä- ja akselivaihtoehtoja on vähän ja todellisuuteen nähden pienet kaarresäteet (karuselliradat) tai pienet nopeudet (suorat radat) voivat aiheuttaa tuloksiin vääristymiä.

Koska vasta todelliset tiekokeet antavat oikeat tulokset, AASHO-tiekokeen perusteella lähes 30 vuotta sitten saadut tulokset ovat pohjana vastaavuuslaskelmille. Kuorma-autojen kehitys on AASHO-tiekokeen jälkeen ollut merkittävää ja nykyisin on käytössä monia sellaisia auton rakenne- ja rengasratkaisuja, joista koetta toteutettaessa ei tiedetty mitään.

Teoreettisia laskelmia monikerros- tai elementtiohjelmilla hankaloittaa se, että tierakenne koostuu teoreettisten laskelmien kannalta hankalista materiaaleista ja esiintyvien kuormitusten simulointi riittävällä tarkkuudella on epävarmaa. Teoreettisten laskelmien käyttö tien rakennesuunnittelussa on yleistä ja puutteineenkin täysin hyväksyttyä. Teoreettisten laskelmien tekeminen on suhteellisen halpaa ja mikäli niiden tulokset voidaan varmentaa, ne ovat arvokkaita muilla tavoin saatujen tulosten käyttöalueen laajentamisessa.

Kenttämittaukset jäävät edellisten menetelmien väliin. Kuorma-autojen tierakenteeseen aiheuttamat jännitykset ja muodonmuutokset mitataan suoraan rakenteesta. Kenttäkokeiden tulokset voidaan muuntaa tien rasitusta kuvaaviksi vastaavuuskertoimiksi käyttämällä tierakenteen vaurioitumismalleja, jotka on muodostettu väsymiskokeiden ja teiden vaurio seurannan perusteella.

Etuna kenttämittauksissa on se, että koko tutkimusmenetelmä on selkeä eikä sisällä sellaisia työvaiheita, joita voitaisiin pelätä manipuloitavan yhtä helposti kuin teoreettisia laskelmia. Mittaukset ovat oleellisesti luotettavampia ja uskottavampia kuin teoreettiset laskelmat. Tämä on erityisen tärkeä tämän tyyppisissä tutkimuksissa, joiden tulokset kiinnostavat poliittisia ja/tai taloudellisia sidosryhmiä.

Kenttämittauksissa mitataan yleensä sidotun kerroksen alapinnan vaakasuoraa venymää sekä sitomattomien kerrosten ja pohjamaan pystysuoria jännityksiä, sillä ne ovat tierakenteen kestävyys kannalta mitoittavia. Eräissä tapauksissa myös muita kohtia on syytä tarkastaa ja erityisesti, koska tien päällysrakenteen paksuus vaihtelee, pystysuoria jännityksiä on syytä mitata usealla eri syvyydellä.

Mittauksissa saadut jännitykset ja muodonmuutokset muunnetaan ns. väsymissuorien avulla tierakenteelle sallituiksi kuormituskertaluvuiksi ja näitä vertaamalla päästään edelleen vastaavuuskertoimiin. Väsymissuorat perustuvat ns. neljänneen potenssin sääntöön eli

$$\left( \frac{\epsilon_a}{\epsilon_b} \right)^4 = \frac{N_b}{N_a}$$

missä  $\epsilon_a$  ja  $\epsilon_b$  ovat akselipainoja  $P_a$  ja  $P_b$  vastaavat muodonmuutokset ja  $N_a$  ja  $N_b$  niitä vastaavat tierakenteen rikkoontumiseen tarvittavat kuormituskerrat.

Karkeasti ottaen muodonmuutokset ovat suoraan verrannollisia akselipainoihin. Tällöin akselipainon kasvaessa 20 % tien elinikä pienenee  $1/1,2^4$ :een eli vajaaseen puoleen.

Ajattelutapaa on selitetty mm. lähteessä /15/ ja mittausmenetelmiä tutkimussarjan aikaisemmissa raporteissa.

Näiden tutkimusten aihepiiri on voimakkaan mielenkiinnon kohteena, sillä erityisesti viime vuosien aikana on tullut käyttöön täysin uusia auto- ja rengasteknisiä ratkaisuja. Suomen aloitteesta ja valmistelemana aihepiiriä on käsitellyt mm. OECD:n tietutkimustoiminnan työryhmä I5 "Raskaiden



käsitellyt mm. OECD:n tietutkimustoiminnan työryhmä I5 "Raskaiden ajoneuvojen ja ilmaston vaikutus tien vaurioitumiseen", jonka raportti valmistui vuonna 1988 /16/.

Suomessa on VTT:n tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio kehittänyt jännitysten ja muodonmuutosten mittaamenetelmiä TIEL:n geokeskuksen toimeksiannosta. Anturit asennettiin ensimmäisessä vaiheessa Otaniemen koekuoppaan, jossa tietä voitiin kuormittaa vain pudotuspainolaitteella tai erittäin hitaasti liikkuvalla kuorma-autolla.

Seuraavana vaiheena oli koekuopan rakentaminen paikkaan, jossa voitaisiin ajaa kuorma-autolla vähintään 50 km/h nopeudella. Tutkimuspaikaksi valittiin kantatie 41:llä oleva lentokoneiden varalaskupaikka Virtaalla, jonne ensimmäinen koekenttä rakennettiin vuonna 1983. Mittauskohta on ajoradan ulkopuolella, mikä takaa täyden työrauhan asennusten ja mittausten aikana. Tie on tasainen ja riittävän pitkä niin, että raskainkin kuorma-autoyhdistelmä saavuttaa 80 km/h nopeuden ja jopa enemmänkin. Paluuajo voi tapahtua helposti kentän toista reunaa pitkin ja tarvittaessa voidaan käyttää useampaa kuormitusajoneuvoa, jolloin kuormituskertoja saadaan paljon kohtuullisessa ajassa.

Virtaan koekentällä on asennettu venymäliuskoja päällysrakenteen sidotun kerroksen ylä- ja alapintaan pitkittäisten ja poikittaisten muodonmuutosten mittaamista varten. Tienpinnan taipumamittausta varten on asennettu taipumatangot. Rakennekerrosten pystysuorien puristusjännitysten mittaamista varten on asennettu painerasioita eri kerroksiin ja pohjamaahan.

Liikenteen tierakenteeseen aiheuttamien jännitysten ja muodonmuutosten mittaamenetelmien kehittäminen on viime vuosina kiinnostanut myös monia tutkimuslaitoksia. Tähän on useimmissa tapauksissa ollut syynä uusien tierakennetutkimuksissa käytettävien koetiekoneiden rakentaminen. Uusia koetiekoneita on valmistunut mm. Tanskassa, Ranskassa, Sveitsissä (2 kpl), Englannissa, Espanjassa, Hollannissa, Yhdysvalloissa, Brasiliassa, Australiassa ja Uudessa Seelannissa.

Yleistä kiinnostusta osoitti myös OECD:n vuonna 1984 järjestämä asfaltti-päällysteiden muodonmuutosantureiden vertailukoe Nardossa Italiassa. Tähän osallistui yhdeksän tutkimusryhmää kahdeksasta maasta, mm. VTT:n tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio TIEL:n kustantamana kehittämällään anturityypillä /5, 6/.

Vuonna 1985 alettiin VTT/TGL:n mittauksissa käyttää mikrotietokonetta mittaussignaalien rekisteröintiin ja lukemiseen /17/. Aluksi mitattiin kerralla 8

kanavaa ja mittauksen syöttöjännite oli millivoltti-tasolla. Vuonna 1986 ostettiin mikroon toinen mittauskortti, jolloin voitiin mitata 16 kanavaa kerralla. Vuodesta 1987 lähtien on lisävahvistimen hankinnan jälkeen mittauksia tehty 16 kanavalla samaan aikaan ainoastaan vahvistimien kautta voltti-tasolla.

Mittaustiedon keräämiseen ja käsittelyyn mikrotietokoneella on käytetty runsaasti voimavaroja. Nykyinen ohjelmisto sisältää yli sata ohjelmamoduulia, joiden avulla pystytään tekemään kaikki mittausten kannalta tärkeät toimenpiteet. Tulosten alustava käsittely tapahtuu käytännössä reaaliajassa, joten mittauksia pystytään ohjaamaan tarvittaviin kohtiin.

Mikrotietokoneen käytön alusta asti kaikki mittaussignaalit on tallennettu mahdollista myöhempää käyttöä varten. Useimmat muut tutkimuslaitokset rekisteröivät vain huippujen arvot.

Edelleen jatkuva tutkimussarja on alkanut vuonna 1980. Vuosittain on tehty 1 - 3 tutkimusraporttia, yhteensä kuusitoista. Tuloksia on lisäksi esitetty lukuisissa kansallisissa ja kansainvälisissä konferensseissa /18-37/.

TIEL:n geokeskus on lisäksi tilannut VTT:n tie- ja liikennelaboratoriolta tierakenteen teoreettisia laskelmia koskevan tutkimusohjelman. Siitä on tähän mennessä raportoitu tierakenteessa mitattujen ja laskettujen arvojen vertailua /38/, tierakenteen mitoitusmenetelmiin sisältyvien väsymissuorien määrittäminen /39/, kuorma-autoakselistojen vertailu /40/, tierakenteen kantavuuden herkkyysanalyysi /41/ ja Odemarkin menetelmän tarkastelu /42/.

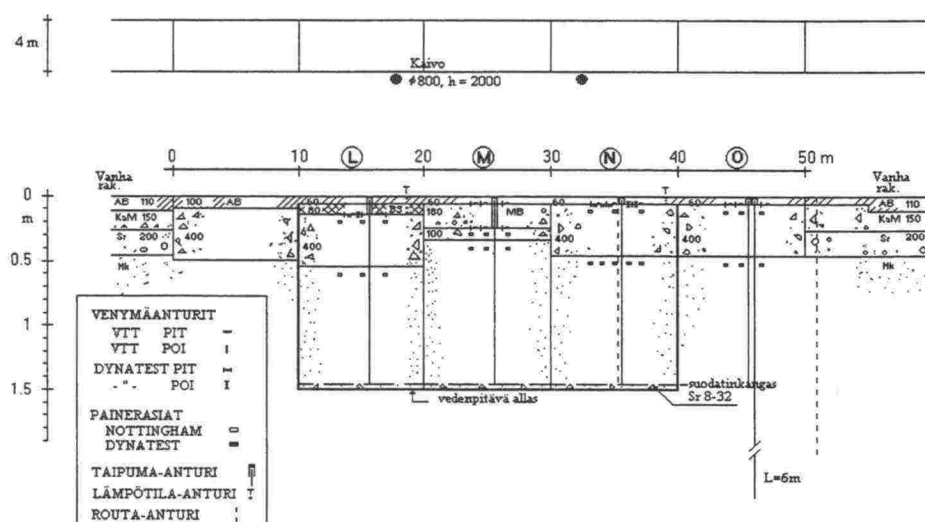
## 2 TUTKITTAVAT ASIAT

Virtaalla on vuonna 1987 rakennettu mittauskenttä, joka sisältää yli sata anturia ja on edelleen toimintakunnossa. Mittauskenttä on rakennettu suoraan osaksi tierakennetta, joten pohjaveden pinnan taso on kentällä sama kuin ympäristössäkin. Virtaankankaalla pohjavesi on syvällä, noin 20 metrin syvyydessä. Aikaisempien mittausten kannalta on hyvä, että pohjavesi on ollut syvällä, koska silloin pohjaveden pinnan muutokset eivät vaikuta mittaustuloksiin ja täten vaikeuta eri aikana tehtyjen mittausten vertailua.

Kun pohjavesi on lähellä tierakennetta, sen tiedetään vaikuttavan liikennekuorman tierakenteeseen aiheuttamiin rasituksiin /43/. Asian tutkimiseksi Virtaalle rakennettiin vuonna 1990 uusi mittauskenttä, jossa pohjaveden tasoa voidaan säädellä. Tämän tutkimuksen yhtenä osana oli pohjaveden pinnan tason vaikutuksen tutkiminen tierasituksiin korkeassa lämpötilassa, kun vuosina 1991 - 1992 oli tutkittu vaikutuksia tierasituksiin lämpötilassa 0 - 10 °C /44/.

Pohjaveden pinnan tason vaikutusta tierasituksiin korkeassa lämpötilassa tutkittiin 6.8. - 14.8.1992. Tavoitteena oli saavuttaa päällysteen lämpötilaksi vähintään 30 °C. Sääennusteen lupaamasta helteestä huolimatta jäivät mittauslämpötilat kuitenkin verraten alhaisiksi ollen enimmillään 22 °C.

Toisena tutkittavana asiana oli roudan sulamisen simulointi ja tierasitusten mittaaminen niissä olosuhteissa. Mittauksiin käytettiin vuonna 1990 rakennettua uutta kenttää, joka on esitetty kuvassa 1 ja tarkemmin liitteessä 1.



Kuva 1: Koekentän rakenteet.



Kentässä on kolme rakennetta tehtynä pohjavesialtaaseen:

- paksu AB-rakenne = "L", (60 mm AB + 80 mm BS)
- maabetonirakenne = "M", (60 mm AB + 180 mm MB)
- ohut AB-rakenne = "N", (60 mm AB)

Lisäksi altaan ulkopuolelle on tehty referenssirakenteeksi:

- ohut AB-rakenne = "O", (60 mm AB).

Rakenteet on suunniteltu erilaisille liikennemäärille. Ohut AB-rakenne kuuluu päällysrakenneluokkaan 4 ja sen on arvioitu kestävän 0,5 miljoonaa kuormitusta. Paksu AB-rakenne kuuluu päällysrakenneluokkaan 1 ja sen on arvioitu kestävän yli 5 miljoonaa kuormitusta. MB-rakenne kuuluu päällysrakenneluokkaan 1 ja sen on arvioitu kestävän yli 8 miljoonaa kuormitusta.

Tässä tutkimuksessa aluetta "O" ei ole analysoitu, koska mittauksia ei tehty altaan ollessa kuivana.

Mitatut suureet olivat päällysteen pinnan taipuma, sidotun kerroksen alapinnan venymä, sitomattomien kerrosten jännitys ja huokospaine.

Päällysteen pinnan taipumat mitattiin VTT:n tekemillä taipuma-antureilla käyttäen referenssitasona pohjaan ankkuroituja terästankoja. Kuhunkin koerakenteeseen oli asennettu pystysuora tanko päällysteen pinnan taipuman mittaamiseksi.

Altaan pohjan läpi tankoja ei voitu viedä, joten ne olivat vain 1,4 m pitkiä ja mittaavat siis vain sitä suhteellista taipumaa, mikä tapahtuu rakenteessa pinnan ja 1,4 m syvyyden välillä. Tämän suhteellisen taipuman ja pinnan kokonaistaipuman vertaamiseksi altaan ulkopuolelle asennettiin sekä 1,4 m että 6 m pitkät taipumatangot. Näiden avulla voidaan verrata kuitenkin eri syvyyksillä tapahtuvia taipumia vain yhdessä rakenteessa pohjaveden sijaitessa syvällä.

Venymät mitattiin sidotun kerroksen alapintaan liimatuilla venymäliuskoilla; asiaa on selvitetty perusteellisemmin mm. viitteessä 6.

Jännitykset mitattiin sitomattomiin kerroksiin ja pohjamaahan asennetuilla paineantureilla. Ne ovat metallista, usein titaanista tehtyjä pyöreitä rasioita, joiden keskikohta (kalvo) on ohut, esimerkiksi tässä tutkimuksessa käytetyissä Nottinghamin yliopiston valmistamissa antureissa 2 mm ja reunoilta paksum-

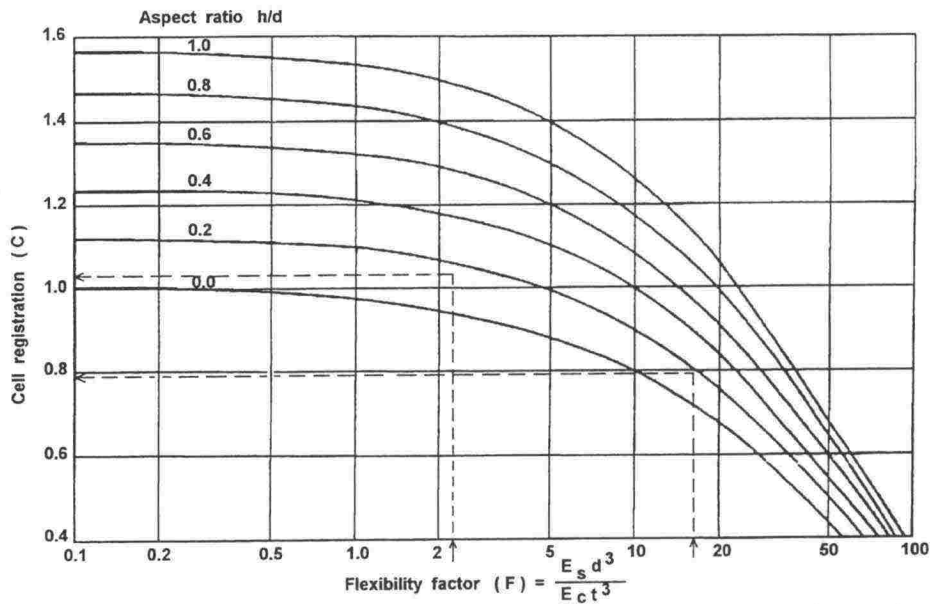
pia, tässä tapauksessa 11 mm ja halkaisija 64 mm. Kalvon sisäpinnalle liimataan venymäliuskat. Rasia suljetaan kannella.

Paineanturin kimmomoduuli on suurempi kuin ympäröivän materiaalin, joten se häiritsee jännitystilaa. Mittaus perustuu siihen, että kalvo taipuu keskeltä ja tämä taipuma mitataan. Reunaosat ovat täyttä metallia, joten sen kokoonpuristuma on mitätöntä keskustan taipumaan verrattuna. Jännitys mitattavassa materiaalissa on suurin peräänantamattoman reunan kohdalla ja pienempi peräänantavan keskustan kohdalla. Näiden suhteisiin vaikuttaa myös ympäröivän sitomattoman materiaalin kimmomoduuli.

Mikäli taipuma on suuri, ympäröivä sitomaton materiaali voi holvaantua, mikäli taasen pieni, anturin herkkyyys saattaa olla liian pieni vaikka itse tarkkuus onkin suurempi, sillä jäykkä anturi antaa luotettavamman tuloksen kuin vähemmän jäykkä.

Jännitystila on kolmiakselinen paineanturin ympäristössä. Jännityssuhteisiin vaikuttaa Poisson-luku ja mm. kuormituksen laatu, onko kyseessä pistekuorman kaltainen kuten auton pyörä vai tasainen, omasta painosta tuleva kuormitus. Näiden vaikutusten suuruutta on vaikea arvioida, mutta ne todennäköisesti vaikuttavat siihen suuntaan, että mitattu jännitys on suurempi kuin todellinen.

Mittauksessa tulevaa virhettä on arvioitu anturin paksuussuhteen ( $\text{aspect ratio} = h/d$ ) ja taipuisuuden (flexibility factor, joka on funktio rasian kalvon paksuudesta ja halkaisijasta sekä rasian ja ympäröivän maamateriaalin kimmomoduuleista) perusteella (kuva 2). Tässä raportissa kuvatut mittaukset on tehty Nottinghamin yliopiston valmistamilla antureilla. Kuvan 2 perusteella voidaan arvioida, että nämä anturit antavat noin 20 prosenttia liian pienen arvon kantavassa kerroksessa ja vastaavasti 5 prosenttia liian suuren arvon pohjamaassa. Muiden tekijöiden merkitystä ei pystytäkään tässä numeerisesti arvioimaan.



Kuva 2: *Painerasian virheen arvioiminen rasian paksuussuhteen (aspect ratio) ja taipuisuuden (flexibility factor) perusteella.*

Jännitystä sitomattomassa materiaalissa ei siis mitata suoraan, vaan mittaus perustuu venymään tai deformaatioon. Monista ongelmista aiheutuen esim. professori S.F.Brown toteaa, että 20 prosenttia parempia tarkkuuksia ei pidä olettaa saavutettavan /45/. VTT on käyttänyt jännitysmittauksia yleensä vain erityyppisten ja -suuruisten pyöräkuormien aiheuttamien suhteellisten jännitysten mittauksiin, jolloin absoluuttiset arvot eivät ole niin tärkeitä. Edellä esitetyt näkökohdat on alusta asti otettu huomioon mm. omia antureita tehtäessä ja antureita asennettaessa.

Huokospainetta mitattiin kahdella Oulun yliopiston valmistamalla huokospainemittarilla, joissa oli käytetty "Druck Limited PDCR 81"-anturia.

Routamittauksia varten kenttään asennettiin anturilinjalle yksi routamittari (PL 35 m) ja kentän ulkopuolelle toinen (PL 51). Pohjaveden pinnan havainnoimiseksi asennettiin kenttään yksi pohjaveden korkeuden havaintoputki (PL 32).

Roudan sulamisen simuloimista varten jätettiin pohjavesialtaaseen syksyllä 1992 vettä noin yksi metri, jolloin pohjaveden pinta on hiekkakerroksen (= pohjamaa) yläpinnassa. Rakenne jäättyi talven aikana. Sulamista seurattiin kevään kuluessa ja mittaukset ajoitettiin siten, että routa oli sulanut altaan kohdalla pinnasta ensimmäisellä kerralla 0,3 m ja toisella kerralla 0,5 m.

Mittauksia tehtiin ensin vallitsevissa olosuhteissa, eli rakenteen kosteustila oli muodostunut roudan sulamisprosessin mukaisesti. Sitten kyllästettiin roudan yläpuolinen, sulanut kerros vedellä asfaltin alapintaan asti, mikä on kantavan



kerroksen osalta pahin mahdollinen roudan sulaessa esiintyvä tilanne. Kuormituksena käytettiin sekä kuorma-autoa että pudotuspainolaitetta. Mitattavina suureina olivat päällysteen alapinnan venymät, päällysteen pinnan taipuma, sitomattomien kerrosten jännitykset, kosteus ja dynaaminen huokosvedenpaine kuormituksen ylittäessä mittauspisteen.

Mittauksia tehtiin ensimmäisen kerran 30.3. - 2.4.1993 ja toisen kerran 14. - 16.4.1993 välisenä aikana. Myöhemmin käytetään ensimmäisestä mittauskerasta nimitystä maaliskuun mittaukset ja toisesta huhtikuun mittaukset. Mittauslämpötilat olivat maaliskuun mittauksissa 0 - +3 °C ja huhtikuun mittauksissa +10 - +12 °C.

Kolmantena tutkittavana asiana oli tien reunavaikutuksen tutkiminen kuormituksen aiheuttamiin päällysteen muodonmuutoksiin. Reunavaikutuksen tutkimiseksi asennettiin uusia antureita 0,5 m:n etäisyydelle päällysteen reunasta, kun nykyinen anturilinja on 1,5 m:n etäisyydellä reunasta. Reunalinjalle asennettiin asfaltin alapintaan viisi pitkittäistä ja viisi poikittaista anturia sekä asfaltin yläpintaan kolme poikittaista anturia.

Tien kantavuuden pieneneminen reunalinjan läheisyydessä riippuu lähteen /46/ mukaan mm. kuormituspinnan etäisyydestä tien reunasta, kuormituspinnan leveydestä, tien leveydestä, pientareen leveydestä, luiskan kaltevuudesta ja penkereen korkeudesta sekä rakennemateriaalien lujuusominaisuuksista. Näistä tärkeimmät ovat kuormituksen etäisyys tien reunasta (tien leveys) ja penkereen luiskan kaltevuus.

Kantavuuden pieneneminen tien reunan läheisyydessä lisää muodonmuutoksia verrattuna saman suuruisen liikennekuorman aiheuttamiin muodonmuutoksiin tien keskialueella, jolloin päällysteen rasittuminen tien reunassa on voimakkaampaa kuin keskialueella.

Tien reunavaikutuksen selvittäminen kuormituksen vaikutuksesta syntyviin jännityksiin ja muodonmuutoksiin on tarpeen, jotta niiden vaikutukset tien kestoikään pystytään selvittämään ja eliminoimaan mahdollisimman tehokkaasti.

Tien reunavaikutuksen selvittämiseen tähtääviä mittauksia tehtiin elokuussa 1992 samassa yhteydessä, kun tutkittiin pohjaveden pinnan tason vaikutusta tierasituksiin korkeissa lämpötiloissa. Toisen kerran mitattiin reunan vaikutuksia roudan sulamisen simuloinnin yhteydessä huhtikuussa 1993.

Pohjaveden pinnan tason vaikutusta tierasituksiin korkeissa lämpötiloissa tutkittiin erilaisilla altaan täyttöasteilla. Vastaavista pohjaveden pinnan tasoista käytetään tuloksia käsiteltäessä seuraavassa esitettyjä nimityksiä:

## Altaan täyttöaste:

-----

- allas tyhjänä
- altaassa 0,5 m vettä
- altaassa 1,4 m vettä

## Pohjavedenpinnan taso:

-----

- W0 = kuiva allas
- W1 = 1,0 m tien pinnasta
- W3 = 0,1 m tien pinnasta

Kuiva allas vastaa normaalia pohjaveden pinnan tasoa, joka on Virttaankan-kaalla lähes 20 m:n syvyydessä. Modulus-laskelmien tuloksia esittävissä kuvissa on mittakaavasyistä käytetty pohjaveden pinnan tasona 10 m tien pinnasta.

Korkeampi veden pinnan taso (W3) vastaa tilannetta, jolloin koko rakenne on veden kyllästämä päällysteen alapintaan asti. Alempi veden pinnan taso (W1) vastaa tilannetta, jossa pohjamaan pinnasta on likimain kantavan kerroksen paksuinen osa kuivana ja muu osa pohjamaasta on veden kyllästämänä.

Roudan sulamisen simuloinnissa suoritettiin mittauksia aluksi sulamisen jälkeen vallitsevassa tilanteessa, jolloin veden pinta kaivossa oli 0,80 m (= W2) tien pinnasta ja jään yläpinta 0,30 m tien pinnasta.

Seuraavaksi yritettiin täyttää jääkerroksen yläpuolinen kantavan kerroksen murskesorakerros vedellä, mutta siinä osittain epäonnistuttiin. Altaan lumettomalta keskialueelta oli routa sulanut auringon lämmittävästä vaikutuksesta, mutta kaivojen ylemmät putkiyhteydet lumen peittämän pientareen vieressä olivat vielä osittain jäässä, eikä vettä saatu täysin tyydyttävästi imeytymään jään yläpuoliseen kerrokseen. Kaivojen kautta imeyttämisen lisäksi laskettiin vettä myös kentän pintaan. Veden imeytyminen oli kuitenkin erittäin hidasta, joten imeytys lopetettiin. Koska ylin veden pinnan taso (= W3) 0,10 m tien pinnasta jäi saavuttamatta käytetään maaliskuun mittauksen raportoinnissa ylimpänä veden pinnan tavoitetasona (= W3) 0,20 m tien pinnasta.

Lopuksi pumpattiin kaivoista vesi pois niin, että alimmaksi veden pinnan tasoksi (= W1) muodostui 1,0 m tien pinnasta.

Huhtikuun mittaukset aloitettiin täyttämällä allas aivan asfaltin alapinnan tasoon, eli ylin vedenpinnan taso (= W3) oli 0,10 m tien pinnasta. Muut rasiusmittauksissa käytetyt vedenpinnan tasot huhtikuun mittauksissa olivat keskimääräinen taso (= W2) 0,50 m tien pinnasta ja alin taso (= W1) 1,30 m tien pinnasta.

Mittauksessa käytettiin kuormituksena kuorma-autoa ja pudotuspainolaitetta. Kuorma-autolla kuormitettaessa mitattiin päällysrakenteen sidotun kerroksen alapinnan venymät, päällysrakenteen taipumat ja päällysrakenteen sitomatto-

mien kerrosten jännitykset. Pudotuspainolaitteella kuormitettaessa mitattiin päällysrakenteen taipumasuppilot.

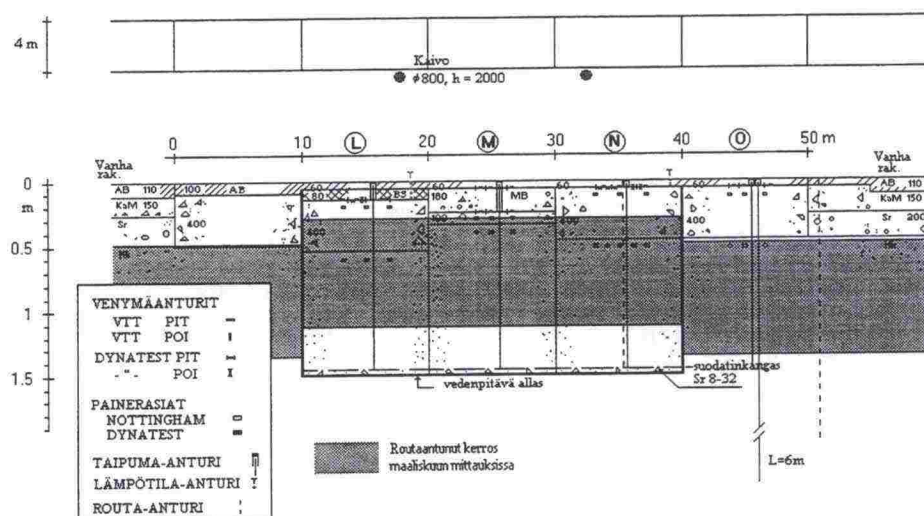
Kaikissa mittauksissa käytettiin kuorma-auton ajonopeutena 50 km/h ja reunavaikutuksen mittauksissa lisäksi hitaana nopeutena 5 km/h.



### 3 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

#### 3.1 Roudan simulointi

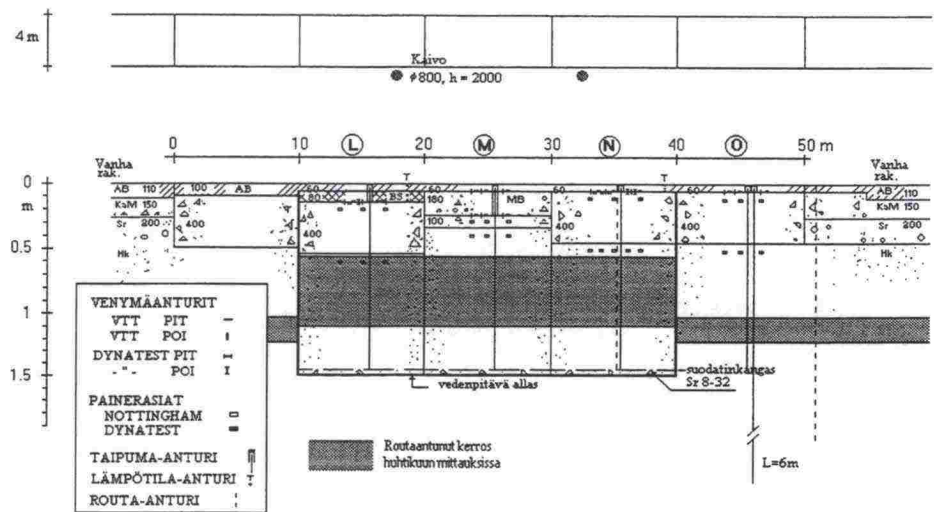
Roudan sulamista seurattiin maaliskuun alkupäivistä lähtien. Kun routa oli sulanut 0,30 m tien pinnasta, tehtiin ensimmäiset mittaukset maalis-/huhtikuun vaihteessa. Kuvassa 3 on esitetty routaantuneen kerroksen sijainti maaliskuun mittausten aikana. Pohjavesialtaan kohdalla roudan yläpinta oli mittausten aikana 0,28 - 0,30 m tien pinnan alapuolella ja routakerroksen paksuus 0,82 m. Altaan ulkopuolella roudan yläpinta oli 0,45 - 0,51 m tien pinnan alapuolella ja routakerroksen paksuus 0,87 m.



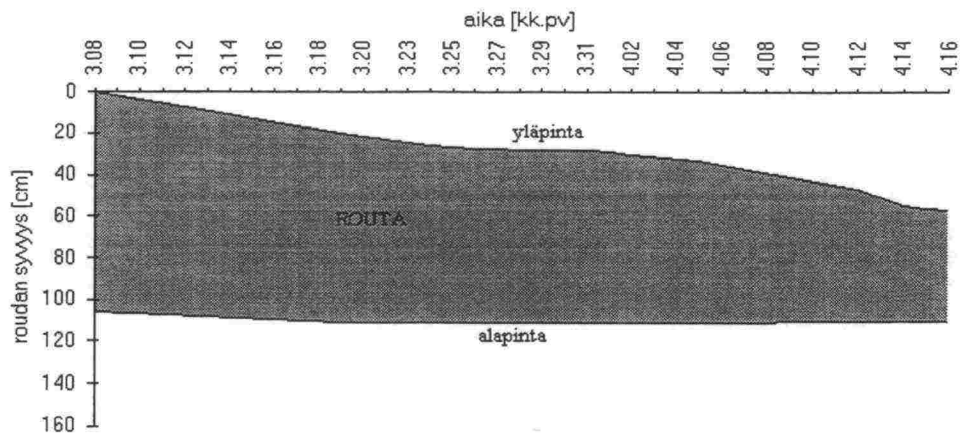
Kuva 3: Routakerros maaliskuussa.

Toiset mittaukset tehtiin huhtikuun puolivälissä, kun routa oli sulanut 0,5 m tien pinnasta. Kuvassa 4 on esitetty routaantuneen kerroksen sijainti huhtikuun mittausten aikana. Pohjavesialtaan kohdalla roudan yläpinta oli mittausten aikana 0,55 - 0,57 m tien pinnan alapuolella ja routakerroksen paksuus 0,54 m. Altaan ulkopuolella roudan yläpinta oli 0,98 - 1,08 m tien pinnan alapuolella ja routakerroksen paksuus 0,21 m.

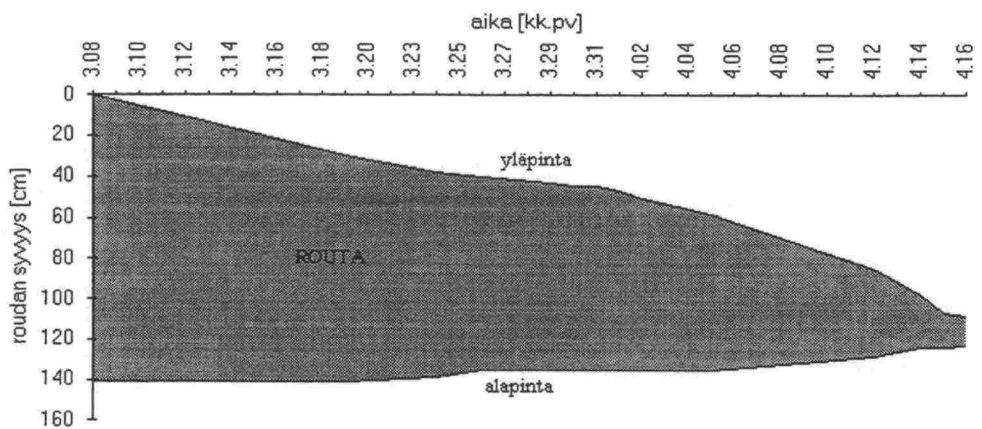
Veden kyllästämä rakenne pohjavesialtaassa ei ole jäänyt talven aikana niin syväälle, kuin ulkopuolinen kuivempi perusmaa. Altaan routaantunut kerros sulaa huomattavan paljon hitaammin, kuin altaan ulkopuolinen routakerros. Kuvissa 5 ja 6 on esitetty roudan sulamisen edistyminen altaassa ja sen ulkopuolella.



Kuva 4: Routakerros huhtikuussa.



Kuva 5: Roudan sulamisen eteneminen altaassa.



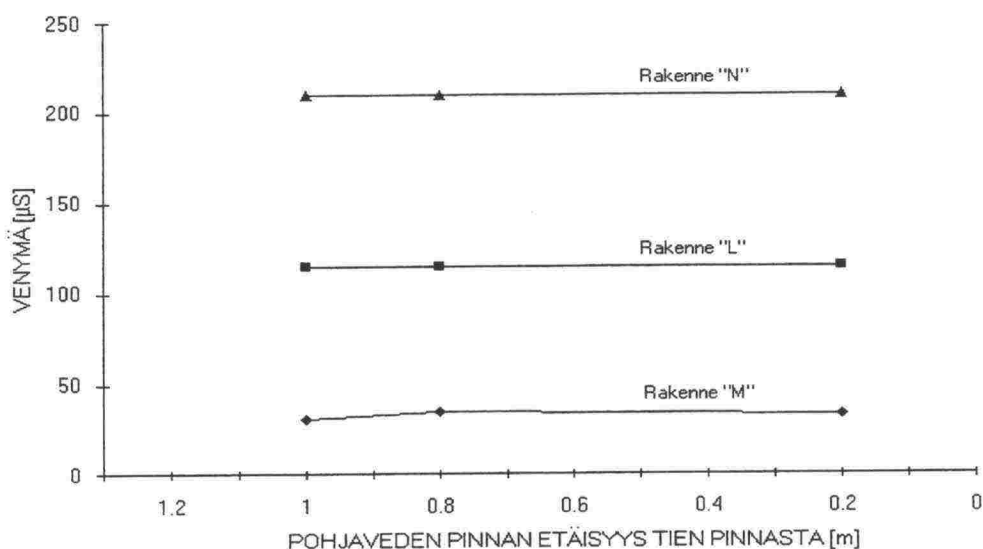
Kuva 6: Roudan sulamisen eteneminen altaan ulkopuolella.

### 3.1.1 Kuormituksena auto

#### 3.1.1.1 Maaliskuun mittaukset

Ylin vedenpinnan taso jäi epämääräiseksi osittain jäisen rakenteen takia. Tuloksissa on esitetty tältä osin veden pinnan tavoitetaso, koska veden pinta oli todennäköisesti alempi kuin tarkkailuputkesta mitattu. Muilta osin ei veden pinnan säätelyssä ollut ongelmia. Mittausten aikana päällysteen lämpötila vaihteli välillä 0 - +3 °C eli päällyste oli hyvin jäykkää.

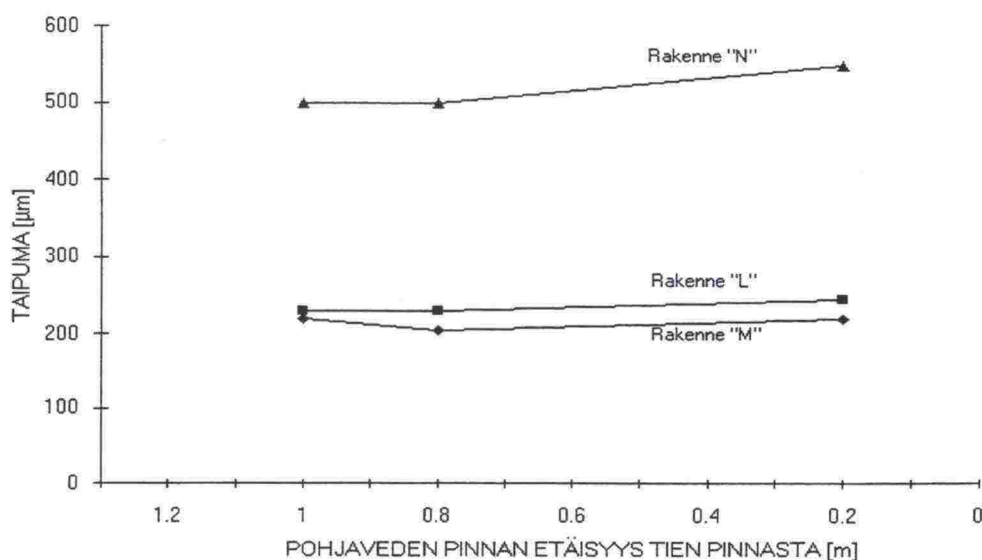
Kuvassa 7 on esitetty venymä sidotun kerroksen alapinnassa vedenpinnan korkeuden funktiona. Vedenpinnan sijainnilla ei ole vaikutusta venymiin millään rakenteella. Rakenteet ovat niin jäykkiä (AB, jäätynyt SrM), että routakerroksen alapuolella olevalla vedellä ei ole vaikutusta. Ylimmällä tasolla vettä ei saatu imeytymään rakenteeseen täysin tyydyttävästi, joten routakerroksen yläpuolinen murskekerros ei ollut täysin veden kyllästämä.



Kuva 7: Venymät sidotun kerroksen alapinnassa maaliskuun mittauksissa. Kuormituksena auto.

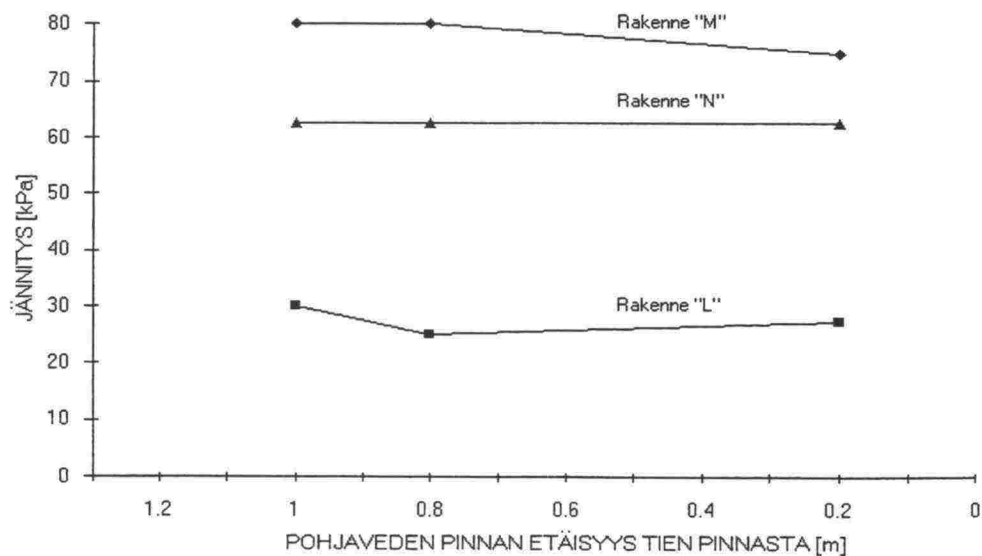
Kuvassa 8 on esitetty tienpinnan taipumat vedenpinnan korkeuden funktiona. Ohuella AB-rakenteella ("N") ensimmäinen vedenpinnan nosto ei vaikuta mitään, mutta toinen nosto lisää taipumaa 10 %. Paksu AB-rakenne ("L") käyttäytyy vastaavasti molemmissa vedenpinnan muutoksissa, mutta lisäys ylimmällä vedenpinnan tasolla on 5 %. Maabetonirakenne ("M") reagoi epäjohdonmukaisella tavalla vedenpinnan korkeuden muutoksiin. Alimmalla ja ylimmällä vedenpinnan tasolla taipuma on sama, mutta keskimmaisella tasolla hieman pienempi.





Kuva 8: Päällysteen pinnan taipumat maaliskuun mittauksissa. Kuormituksena auto.

Kuvassa 9 on esitetty vedenpinnan korkeuden vaikutus sitomattomien kerrosten jännityksiin. Jännitykset on mitattu asfalttirakenteilla ("L" ja "N") hiekkakerroksessa ja maabetonirakenteella ("M") murskekerroksessa. Kuten routakerrosta esittävästä kuvasta 3 nähdään ovat asfalttirakenteissa olevat hiekkakerroksen painerasiat routakerroksen sisässä ja maabetonirakenteen murskekerroksessa olevat painerasiat juuri routakerroksen yläpinnassa.



Kuva 9: Jännitykset sitomattomissa kerroksissa eri rakenteilla maaliskuun mittauksissa. Kuormituksena auto.

Ohuella AB-rakenteella ("N") ei havaittu muutoksia jännityksissä eri vedenpinnan korkeuksilla, muilla rakenteilla vedenpinnan nosto pienensi jännityksiä 5 - 10 %. Tulosta voitaneen selittää mittaustulosten hajontana tai jännitysten jakaantumisen laajemmalle alueelle kantavan kerroksen alentuneen moduulin takia roudan yläpuolisen kerroksen kyllästyessä vedellä.

Maaliskuun mittauksissa on pohjaveden pinnan korkeuden vaihteluilla verraten vähäinen vaikutus mitattuihin tierasituksiin. Yhtenä selityksenä tälle voidaan pitää sitä, että alin veden pinnan taso sijoittuu roudan alapinnan korkeudelle, eikä näin ollen muuta kovinkaan paljon jäätyneen kerroksen ominaisuuksia. Ylin vedenpinnan taso taas on hieman epämääräinen epätäydellisen veden imeytymisen takia.

### 3.1.1.2 Huhtikuun mittaukset

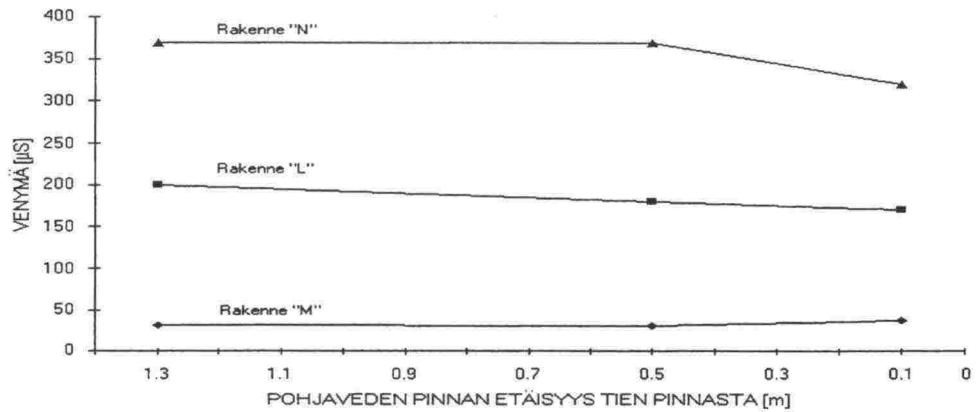
Päällysteen lämpötila vaihteli suoritettujen mittausten aikana välillä +10 - +12 °C. Vedenpinnan korkeuden säätely onnistui hyvin.

Kuvassa 10 on esitetty venymä sidotun kerroksen alapinnassa vedenpinnan korkeuden funktiona. Kahdella alimmalla vedenpinnan tasolla ei ole nähtävissä merkittäviä eroja mitatuissa venymissä. Vain paksun AB-rakenteen ("L") venymä on pienentynyt 10 %. Veden pinnan nostaminen lähelle tien pintaa pienentää venymiä AB-rakenteilla ("L" ja "N") 15 %, mutta maabetonirakenteella vaikutus on päinvastainen, venymä on lisääntynyt 20 %. Syynä lienee rakennekerrosten jäykkyyksien suhteiden muutokset.

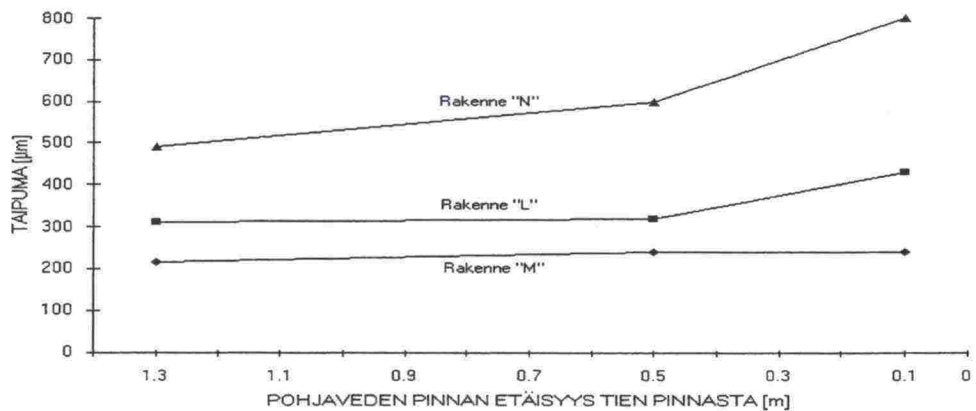
Kuvassa 11 on esitetty tienpinnan taipumat vedenpinnan korkeuden funktiona. Ohuella AB-rakenteella ("N") taipuma kasvaa suhteellisen tasaisesti vedenpinnan korkeuden kasvaessa ja on ylimmällä vedenpinnan tasolla 60 % suurempi kuin alimmalla tasolla. Paksu AB-rakenne ("L") käyttäytyy lähes vastaavasti, mutta lisäys tapahtuu pääasiassa ylimmällä vedenpinnan tasolla ja on kokonaisuudessaan 35 %. Maabetonirakenteella ("M") taipuman lisääntyminen tapahtuu alimman ja keskimmäisen vedenpinnan korkeuden välillä ja on suuruudeltaan 12 %.

Kuvassa 12 on esitetty vedenpinnan korkeuden vaikutus sitomattomien kerrosten jännityksiin. Jännitykset on mitattu samoin kuin maaliskuun mittauksissa asfalttirakenteilla ("L" ja "N") hiekkakerroksessa ja maabetonirakenteella ("M") murskekerroksessa. Routakerroksen sijaintia esittävästä kuvasta 4 nähdään, että paksun AB-rakenteen ("L") painerasiat ovat juuri routakerroksen pinnan alapuolella ja muissa rakenteissa painerasiat ovat roudan yläpuolisessa sulaneessa kerroksessa.

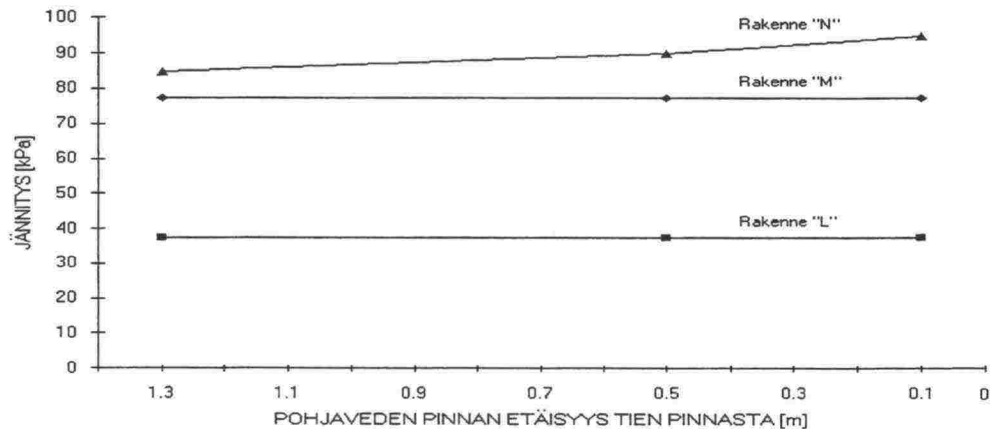




Kuva 10: Venymät sidotun kerroksen alapinnassa huhtikuun mittauksissa. Kuormituksena auto.



Kuva 11: Päällysteen pinnan taipumat eri rakenteilla huhtikuun mittauksissa. Kuormituksena auto.



Kuva 12: Jännitykset sitomattomissa kerroksissa eri rakenteilla huhtikuun mittauksissa. Kuormituksena auto.

Ohuella AB-rakenteella ("N") jännitys lisääntyi tasaisesti vedenpinnan korkeuden lisääntyessä. Kokonaisuudessaan jännityksen lisäys oli 10 %. Muilla rakenteilla ei vedenpinnan korkeuden muutoksilla ollut vaikutusta mitattuihin jännityksiin.

### **3.1.2 Kuormituksena pudotuspainolaite**

#### **3.1.2.1 Tehdyt mittaukset ja tulosten käsittelymenetelmät**

Pudotuspainolaitteella mitattiin noin 10 tonnin akselipainoa vastaavalla kuormituksella taipumasuppilot kussakin kentässä eri pohjaveden pinnan korkeuksilla. Päälysteen lämpötila oli sama kuin autolla kuormitettaessa.

Mittaukset tehtiin altaan alueella kahden metrin välein 0,3 m anturilinjasta tielle päin. Jatkossa esitetyt tulokset ovat kunkin rakenteen (kentän) osalta neljän mittauspisteen keskiarvoja. Materiaaliparametrien hajonta vaikuttaa tuloksiin hyvin merkittävästi. Liitteissä 2-4 on esitetty kerrosmoduulien vaihtelu mittauspisteittäin eri veden pinnan korkeuksilla.

Rakennekerrosten materiaalimoduulit määritettiin mitatuista taipumasuppiloista Modulus-takaisinlaskentaohjelmalla. Laskentaan käytettiin viimeistä kaikkiaan kuudesta pudotuksesta. Ohjelma hakee mitattuihin taipumiin sopivan kerrosmoduulien yhdistelmän vertaamalla niitä lineaarisella monikerrosohjelmalla laskettuihin taipumiin. Modulus-ohjelman laskentaperiaatteita on selostettu tarkemmin tielaitoksen julkaisussa nro 47/1993 Väsymissuorat tierakenteen mitoitus varten /47/.

Ohjelmaan voidaan syöttää neljä eri kerrosta, joten kerroksia on jouduttu yhdistämään, vaikka niiden ominaisuudet poikkeavat esim. veden pinnan tason takia selvästi toisistaan. Rakennekerrosten paksuudet ja jäätyneen kerroksen asema selviävät kuvista 3 ja 4.

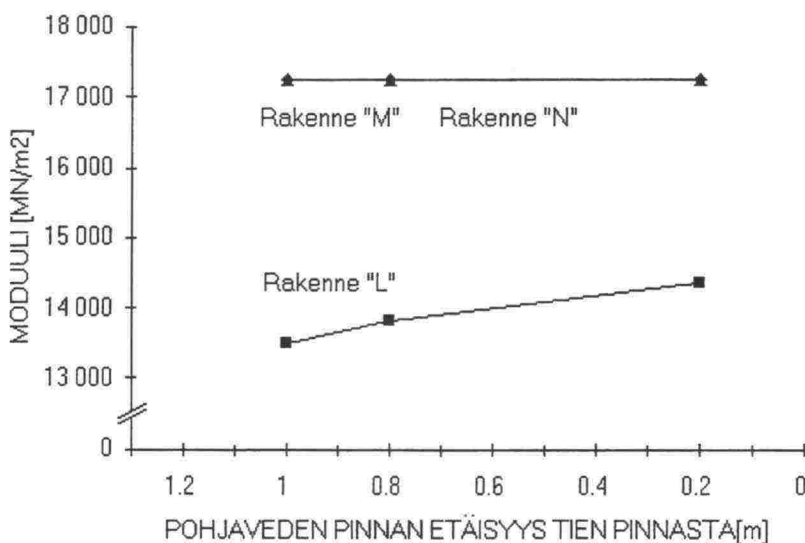
Bitumilla sidotut kerrokset on käsitelty yhtenä kerroksena. Huhtikuun mittausten osalta asfalttikerros ja maabetoni jouduttiin yhdistämään yhdeksi kerrokseksi, mikä kuitenkin antoi realistiselta vaikuttavia tuloksia.

Jäätynyt kerros on kaikissa tapauksissa käsitelty omana kerroksenaan. Näiden väliin jäävä sula kantava kerros on käsitelty yhtenä kerroksena riippumatta veden pinnan tasosta. Pohjamaa on neljäs kerros. Pohjamaahan kuuluu kaikki jäätyneen kerroksen alapinnan alapuolinen materiaali, sekä altaassa että sen alapuolella. Altaassa sijaitsevan pohjamaan ja altaan alapuolisen pohjamaan kosteusolot ovat kuitenkin erilaiset, kun altaassa on vettä.

Asfaltin moduuli on voimakkaasti lämpötilariippuvainen. Muiden rakennekerrosten moduulit eivät riipu lämpötilasta. Haluttu lämpötilakorjaus voidaan tehdä takaisinlaskettuun asfaltin moduuliin. Seuraavassa esitetyt kerrosmoduulien arvot edustavat mittausolosuhteita, eikä mitään lämpötilakorjausta ole tehty.

### 3.1.2.2 Maaliskuun mittaukset

Kuvassa 13 on esitetty asfaltin moduulit. Ohuen asfalttibetonin (rakenteet "M" ja "N") moduuli on kiinnitetty, koska kerros on niin ohut (60 mm). Päällysten lämpötila vaihteli maaliskuun mittauksissa välillä 0 - +3 °C, ts. päällyste oli hyvin jäykkää. Moduulin arvo mittaustilassa (noin 17 000 MN/m<sup>2</sup>) on valittu alustavien laskelmien perusteella. Paksun AB-rakenteen ("L") moduuli on ohjelman laskema ja pienempi, koska se on yhdistelmä asfalttibetonista ja bitumisorasta (60+80 mm). Liitteissä 2/1 - 5 on esitetty kerrosmoduulin vaihtelu mittauspisteittäin maaliskuun mittauksissa.

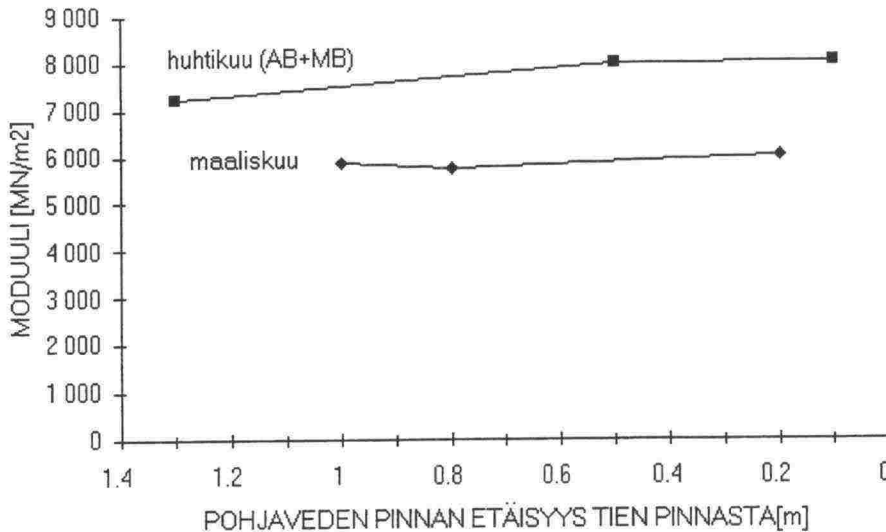


Kuva 13: Asfaltin moduulit maaliskuussa.

Asfaltin moduulin pitäisi olla riippumaton veden korkeusasemasta. Takaisinlasketun moduuliarvon lievää kasvua veden pinnan tason noustessa (rakenne "L") voidaan kuitenkin selittää seuraavalla tavalla: Kun sitomattomat kerrokset ovat veden kyllästävät, niiden moduuli pienenee, jolloin taipumasuppilo on laakeampi. Päällyste painuu "laattamaisemmin" ts. taipuman kaarevuussäde kasvaa, ja takaisinlaskenta antaa asfaltille korkeamman moduuliarvon. Sama ilmiö voidaan havaita huhtikuun mittauksista (rakenteet "L" ja "M").



Kuvassa 14 on esitetty maabetonin moduulit sekä maaliskuu- että huhtikuun mittausten perusteella. Huhtikuun arvo on korkeampi, koska se on laskenta-tekniillisistä syistä yhdistelmä AB:sta ja MB:sta. Suuruusluokaltaan tulos on järkevä ja vaihtelu on pientä.

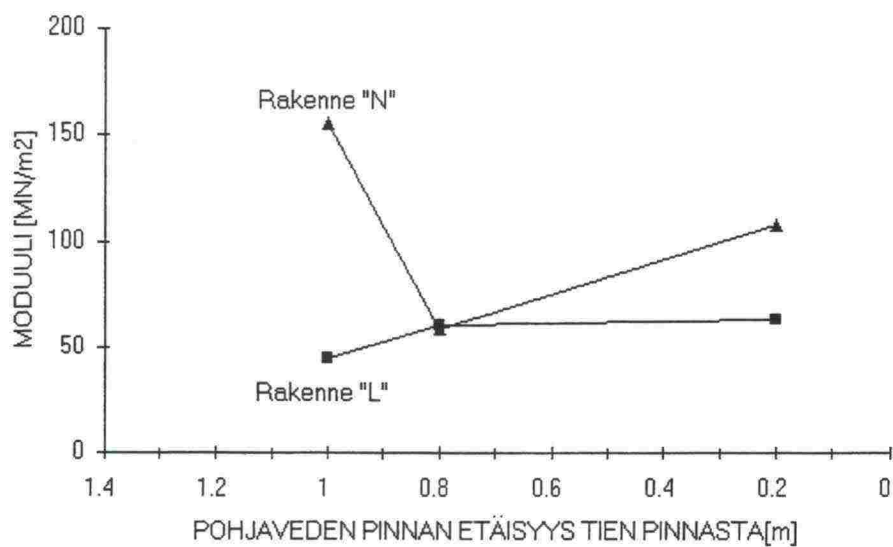


Kuva 14: Maabetonin moduulit.

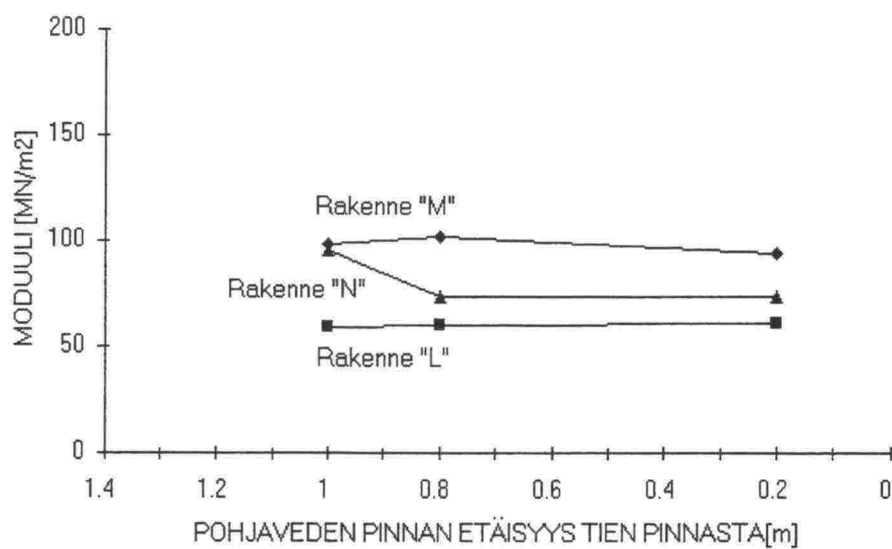
Veden pinnan tason ei pitäisi periaatteessa vaikuttaa maabetonin moduulin arvoon. Kun veden pinnan taso muuttuu, periaatteessa vain sen sitomattoman kerroksen moduuli muuttuu, jonka kosteustila muuttuu. Kerrosten moduulit määritetään kuitenkin pinnan taipumien (ts. koko rakenteen taipumien) perusteella, jolloin kaikkien kerrosten lasketut moduulit muuttuvat jonkin verran veden pinnan tason muuttuessa.

Kuvassa 15 on esitetty kantavan kerroksen (SrM) moduulit. Tulokset vaikuttavat osin ristiriitaisilta. Ohuen AB-rakenteen ("N") tuloksia tarkastellaan lähemmin myöhemmin. Paksun AB-rakenteen ("L") osalta voidaan päätellä seuraavaa: Rakenne on kyseisessä tilassa melko komplisoitu. Sidottujen kerrosten ja jäätyneen kerroksen välissä on noin 15 cm paksuinen sula kantava kerros, joka on veden pinnan tasosta riippuen periaatteessa joko kuiva tai alaosaan veden kyllästämä. Moduulin arvo on kuitenkin hyvin matala ja lähes vakio kaikilla veden pinnan korkeuksilla. Onkin todennäköistä, että kerroksessa on vettä, joka ei ole päässyt poistumaan rakenteesta.

Kuvassa 16 on esitetty vastaavasti pohjamaan (Hk) moduulit. Kaikilla veden pinnan asemilla pohjamaa on veden kyllästämä, joten tulosten pitäisi olla vakioita. Ohuella AB-rakenteella ("N") tapahtuu kuitenkin moduulin pienemistä.

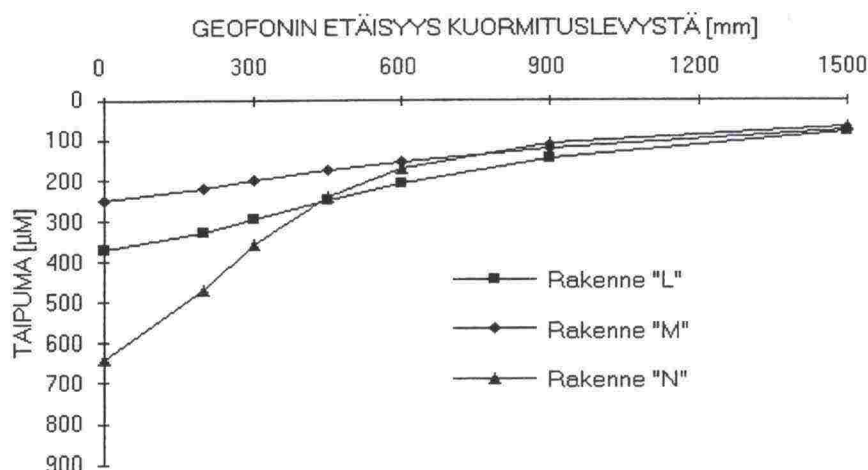


Kuva 15: Kantavan kerroksen moduulit maaliskuussa.



Kuva 16: Pohjamaan moduulit maaliskuussa.

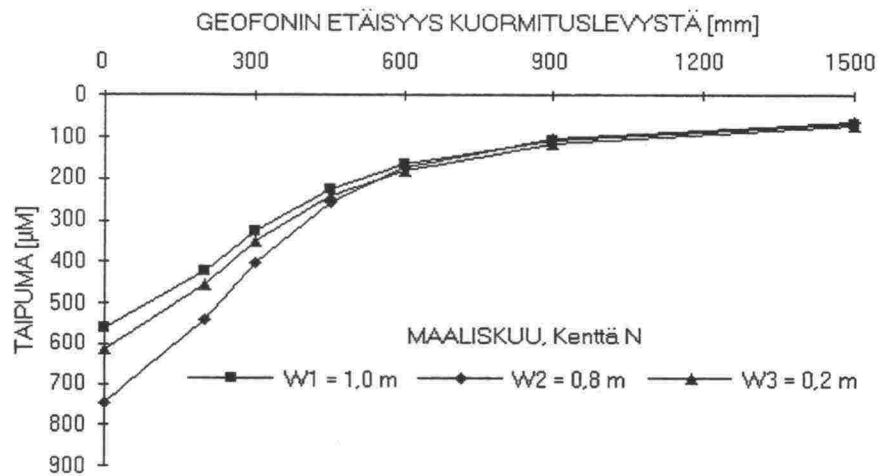
Kuvassa 17 on esitetty keskimääräiset mitatut taipumasuppilot kussakin kentässä. Taipuma kunkin anturin kohdalla on keskiarvo neljän mittauspisteen arvoista kolmella eri veden pinnan tasolla, ts. kahdentoista mittauksen keskiarvo. Kuvasta nähdään selvästi erot eri rakenteiden käyttäytymisessä. Jäykillä rakenteilla (paksu AB, "L" ja maabetoni, "M") taipumasuppilo on laakea ja kokonaistaipuma levyn keskellä on pieni. Ohuella AB-rakenteella ("N") kokonaistaipuma levyn keskellä on suuri ja taipumasuppilo on jyrkempi kuin muilla rakenteilla.



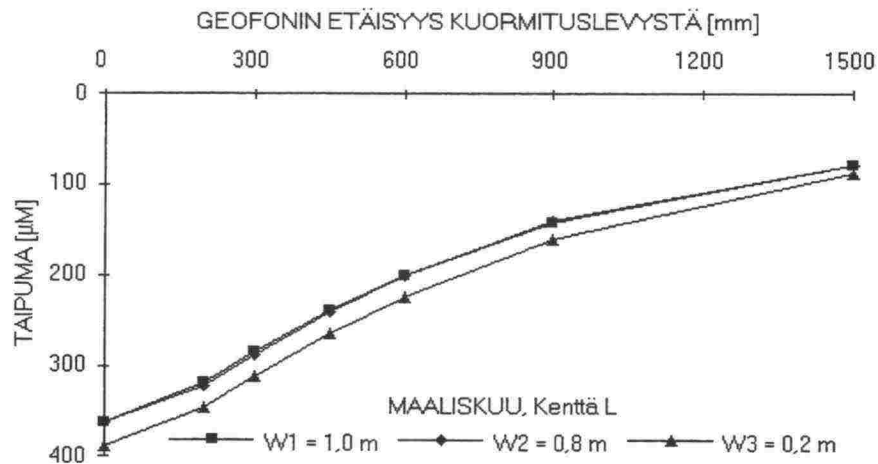
Kuva 17: Eri rakenteiden keskimääräiset taipumasuppilot maaliskuussa.

Kuvassa 18 on esitetty ohuen AB-rakenteen ("N") mitatut taipumasuppilot eri veden pinnan tasoilla. Taipuma kunkin anturin kohdalla on keskiarvo neljän mittauspisteen arvoista. Tuloksissa on epäloogisuutta. Taipumien pitäisi olla suurimmillaan, kun kerrosmoduulit ovat pienimmillään, eli jäätyneen kerroksen yläpuolinen kantava kerros on vedellä kyllästetty (W3). Taipumat ovat kuitenkin suurimmillaan veden korkeudella W2, jolloin kantavan kerroksen pitäisi olla kuiva. Mittaukset veden korkeudella W2 tehtiin ensimmäisenä talven jälkeen. Rakenteeseen lienee jäänyt ylimääräistä siihen sateen jälkeen imeytynyttä vettä, joka ei päässyt pois jään takia. Mitatut taipumat veden korkeudella W1 lienevät oikein. Veden pinta korkeudella W3 ei yltänyt halutulle tasolle, joten taipumat jäivät odotettua pienemmiksi.

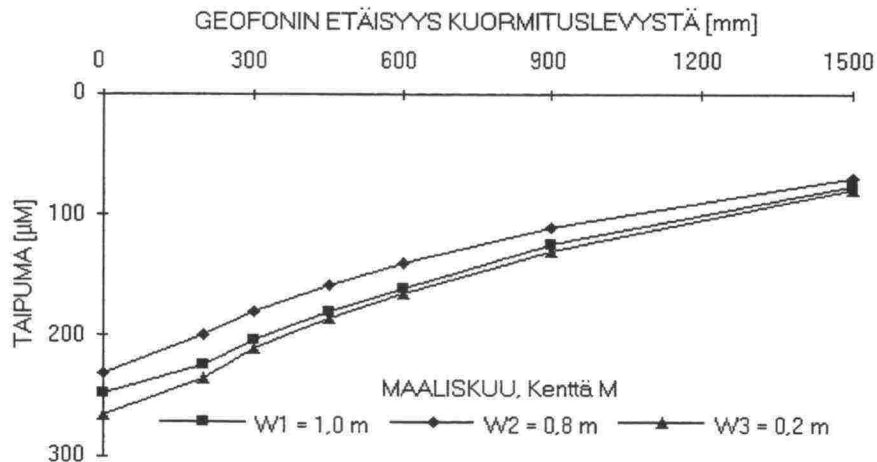
Kuvissa 19 ja 20 on esitetty vastaavat taipumasuppilot paksulle AB-rakenteelle ("L") ja maabetonirakenteelle ("M"). Niistä nähdään, että rakenteilla, joissa on paksut sidotut kerrokset ("L" ja "M"), mitatut taipumat ja niistä takaisinlasketut moduulit ovat loogisempia kuin ohuella AB-rakenteella ("N").



Kuva 18: Ohuen AB-rakenteen ("N") taipumasuppilot eri pohjaveden korkeuksilla maaliskuussa.



Kuva 19: Paksun AB-rakenteen ("L") taipumasuppilot eri pohjaveden korkeuksilla maaliskuussa.

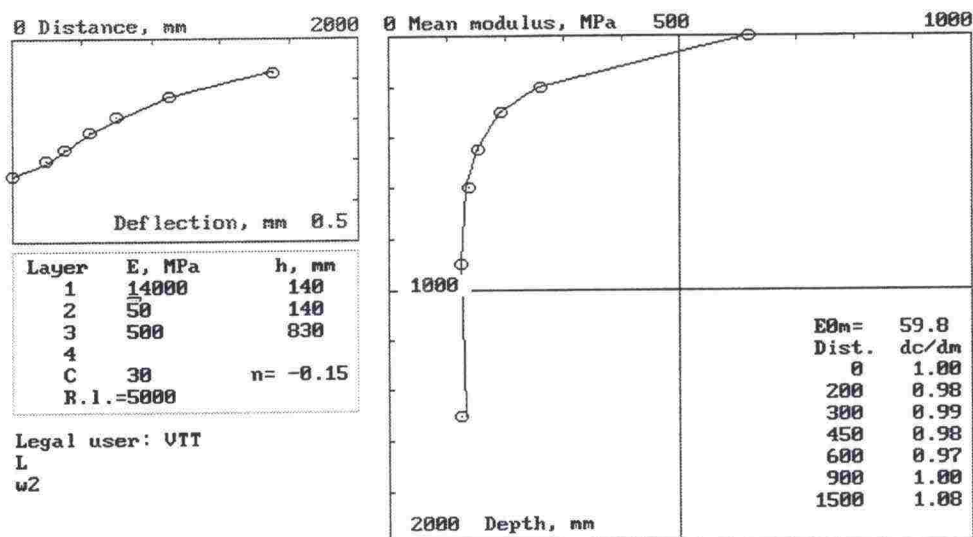


Kuva 20: Maabetonirakenteen ("M") taipumasuppilot eri pohjaveden korkeuksilla maaliskuussa.



Taipumamittausten tuloksia käsiteltiin esimerkinomaisesti myös PAS1-ohjelmalla. Ohjelma toimii interaktiivisesti: Käyttäjä hakee kerrosmoduuleja (ja tarvittaessa paksuuksia) muuttamalla ratkaisun, jolla mitatut ja lasketut taipumat sovitetaan keskenään. Näin voidaan tarkastella tarkemmin esim. yksittäisiä ongelmapistejä. Laskentaperiaate on eri kuin Modulus-ohjelmassa; PAS1-ohjelma käyttää Odemarkin ekvivalenttipaksuuksien menetelmää ja Boussinesqin yhtälöitä /48, 49/. Seuraavissa esimerkeissä ratkaisua on lähdetty hakemaan Modulus-ohjelmasta saaduilla kerrosmoduulien arvoilla.

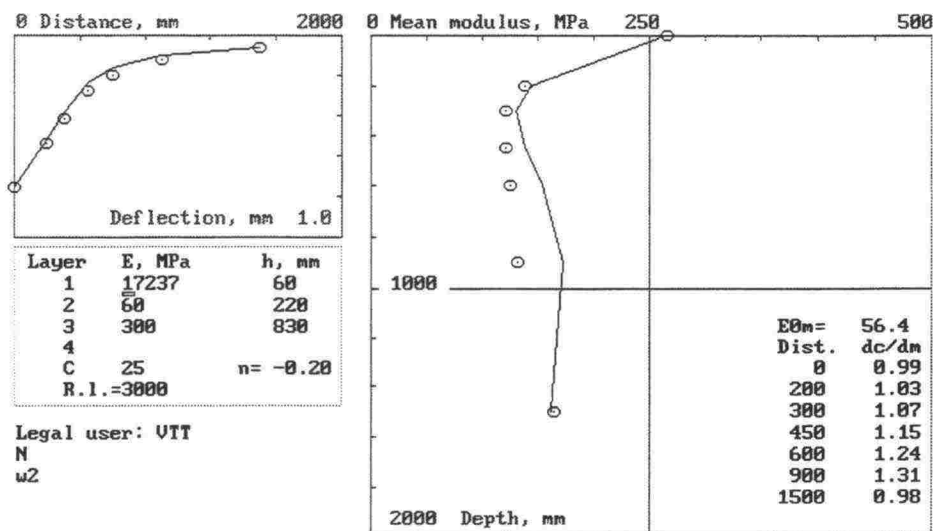
Kuvassa 21 on esitetty paksun AB-rakenteen ("L") yhden mittauspisteen tulos maaliskuulta veden pinnan tasolla W2. Mitattu (ehyt viiva) ja laskettu (ympyrä) taipuma ovat lähellä toisiaan. Kantavan kerroksen moduuli on erittäin pieni (50), mikä kielii rakenteessa olevasta vedestä, ja jäätyneen kerroksen moduuli on suuri (450).



Kuva 21: Pas1-ohjelman tulostus. Maaliskuun mittaukset, rakenteen "L" keskellä, veden korkeus W2.

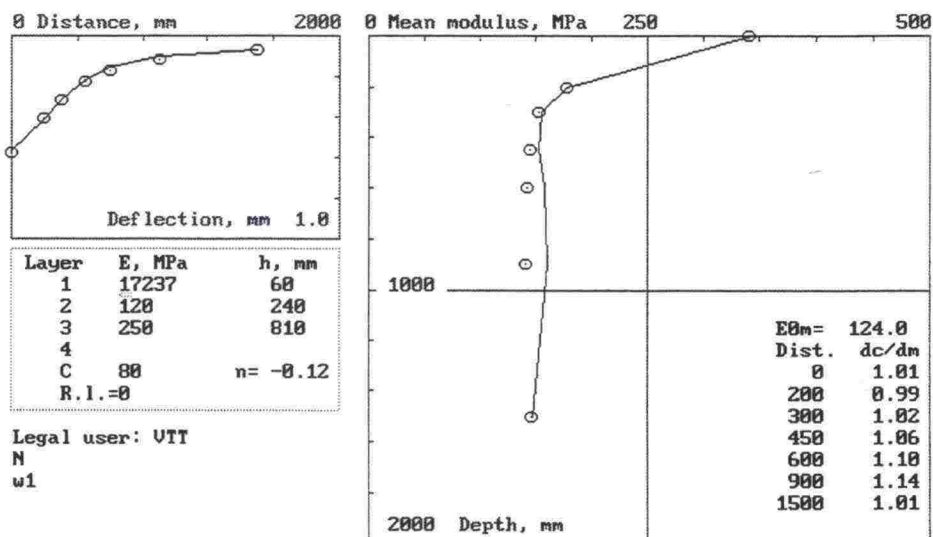
Maaliskuun mittauksissa ohuella asfalttirakenteella ("N") kerrosmoduuleissa on huomattavan suurta hajontaa (vrt. kuvat 15 ja 16 sekä liite 2). Kuvassa 22 on esitetty ohuen AB-rakenteen ("N") mitattu (ehyt viiva) ja laskettu (ympyrä) taipumasuppilo veden pinnan tasolla W2. Kuvassa oikealla näkyvästä pintamoduulin kuvaajasta havaitaan selvästi jäätyneen kerroksen sijainti rakenteessa.





Kuva 22: Pas1-ohjelman tulostus. Maaliskuun mittaukset, rakenteen "N" keskellä, veden korkeus W2.

Kuvassa 23 on esitetty ohuen AB-rakenteen ("N") mitattu (ehyt viiva) ja laskettu (ympyrä) taipumasuppilo veden pinnan tasolla W1. Pintamoduulin kuvaajasta havaitaan, että jäätyneen kerroksen vaikutus rakenteessa on vähäisempi kuin edellisessä kuvassa. Kuten edellä nähtiin, myös Modulus-ohjelmalla saatiin johdonmukaisempia tuloksia veden pinnan tasoilla W1 ja W3 kuin W2.



Kuva 23: Pas1-ohjelman tulostus. Maaliskuun mittaukset, rakenteen "N" keskellä, veden pinnan korkeus W1.

Maaliskuun mittaukset veden pinnan tasolla W2 (veden pinta 0,8 m tien pinnasta) tehtiin talven jälkeisessä tilanteessa heti mittauspaikalle saavuttua. Altaan kosteusolosuhteet ovat mahdollisesti olleet epäselvät. Jäätyneen kerroksen huokosiin saattaa olla jäänyt jään lisäksi ilmaa. Jäätyneen kerroksen alapuoliseen altaassa olevan pohjamaan huokosiin on saattanut jäädä sulana pysynyttä vettä ja ilmaa. Jäätymis-sulamisprosessin vaikutus kosteusolosuhteisiin on myös tuntematon.

Mittaukset muilla veden pinnan tasoilla (W3 ja W1) tehtiin sen jälkeen, kun rakenteeseen oli ensin lisätty vettä ja sitten pumpattu pois. Näin materiaalit ovat olleet "täysin" veden kyllästämiä tai "täysin" kuivia ja tulokset johdonmukaisempia ja helpommin tulkittavissa.

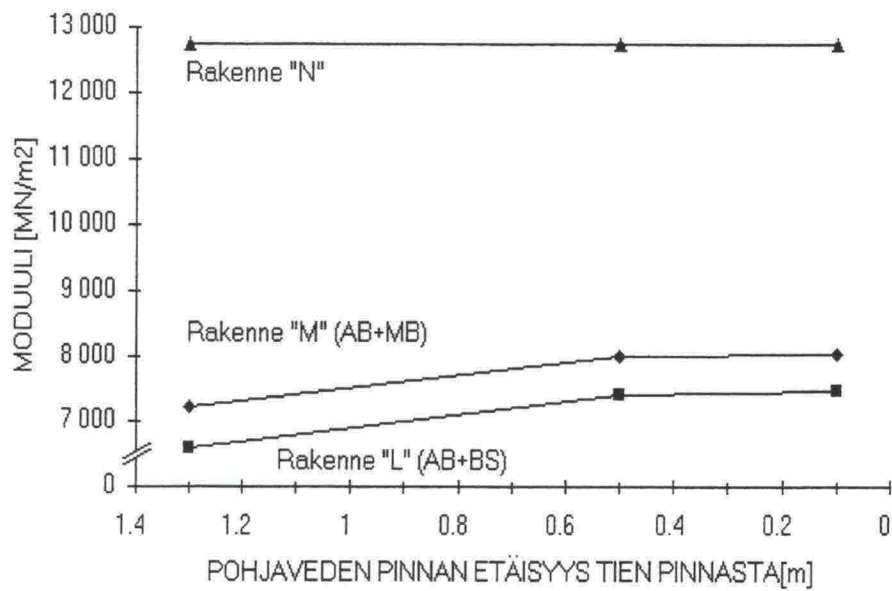
### 3.1.2.3 Huhtikuun mittaukset

Kuvassa 24 on esitetty AB:n moduulit. Ohuen AB-rakenteen ("N") moduuli on kiinnitetty, koska kerros on niin ohut (60 mm). Päälysteen lämpötila vaihteli huhtikuun mittauksissa välillä +10 - +12 °C. Moduulin arvo mittauslämpötilassa (noin 13 000 MN/m<sup>2</sup>) on valittu alustavien laskelmien perusteella. Paksun AB-rakenteen ("L") moduuli on ohjelman laskema ja pienempi, koska se on yhdistelmä asfalttibetonista ja bitumisorasta (60+80 mm).

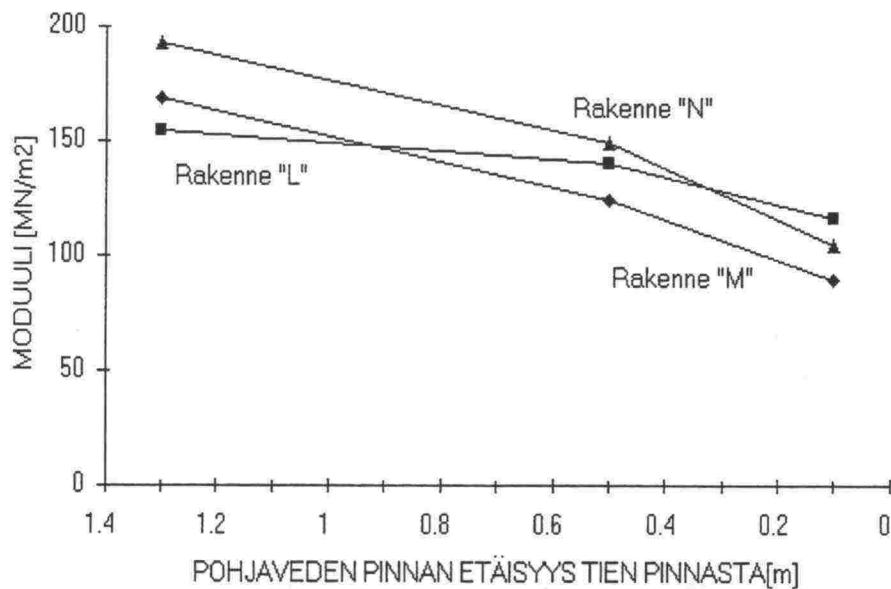
Maabetonirakenteessa ("M") on asfalttibetoni (60 mm) ja maabetoni (180 mm) laskentateknisistä syistä yhdistetty yhdeksi kerrokseksi. Takaisinlaskennan antamaa moduuliarvoa arvioitiin Odemarkin vastinpaksuusmenetelmästä johdetulla kaavalla. Tulokset ovat suuruusluokaltaan järkeviä. Liitteissä 3/1 - 6 on esitetty kerrosmoduulin vaihtelu mittauspisteittäin huhtikuun mittauksissa.

Kuvassa 25 on esitetty kantavan kerroksen moduulit. Veden pinnan nosto pienentää moduuleja, mikä on oletettavaakin. Paksun AB-rakenteenkin ("L") moduuli on samalla tasolla muiden rakenteiden kanssa, joten liika vesi lienee päässyt pois maaliskuun jälkeen rakenteesta. Maabetonirakenteella kantavan kerroksen moduuli on jonkin verran pienempi kuin muilla rakenteilla. Tämä johtuu siitä, että kerros on yhdistelmä tasausmurskeesta ja jäätyneen kerroksen yläpuolisesta pohjamaan hiekasta. AB-rakenteilla kantava kerros on kokonaisuudessaan kalliomursketta.

Kuvasta nähdään myös, että mitä ohuempi päällä oleva sidottu kerros on, sitä suurempi kantavalle kerrokselle laskettu moduuli on. Kantavaan kerrokseen kohdistuva jännitys on suurempi ohuen kuin paksun asfalttipäälysteen alla. Kantavan kerroksen materiaali on jännitysriippuvaa siten, että sen moduuli kasvaa jännitystason noustessa.



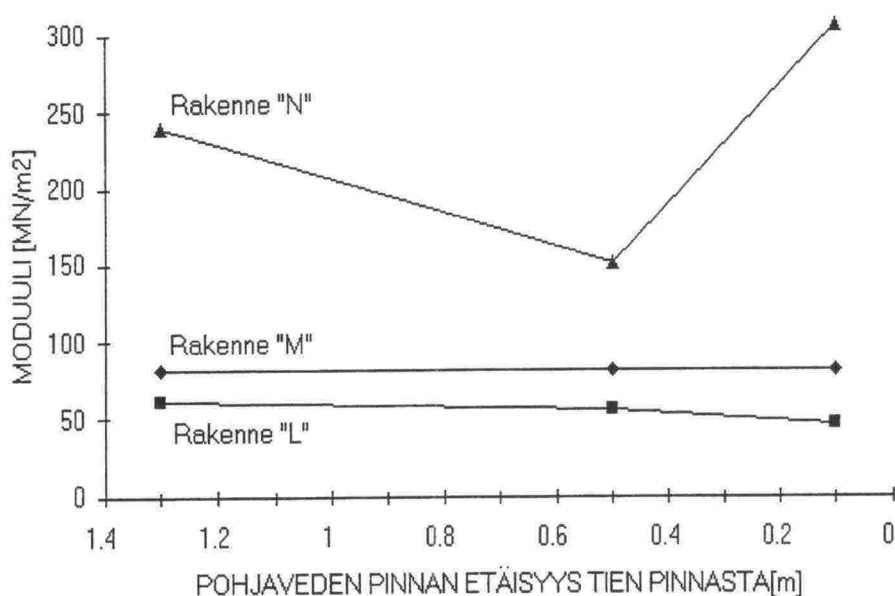
Kuva 24: Asfaltin moduulit eri rakenteilla huhtikuussa.



Kuva 25: Kantavan kerroksen moduulit eri rakenteilla huhtikuussa.



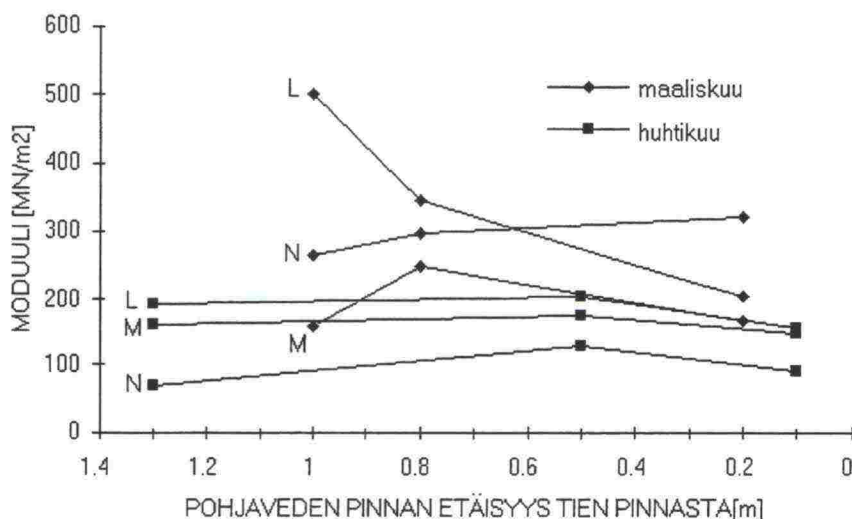
Kuvassa 26 on esitetty sulan pohjamaan moduulit. Kahdella ylimmällä veden pinnan tasolla altaassa oleva pohjamaa (40 cm) oli veden kyllästämää. Paksun AB-rakenteen ja maabetonirakenteen tulokset ovat johdonmukaisia: moduuli pysyy samana tai laskee hieman veden pinnan korkeuden noustessa. Ohuen AB-rakenteen ("N") tulokset vaikuttavat epäjohdonmukaisilta. Liitteen 3/6 kuvasta havaitaan, että takaisinlasketun pohjamaan moduulin hajonta ohuella AB-rakenteella on melko suurta.



Kuva 26: Sulan pohjamaan moduulit eri rakenteilla huhtikuussa.

Kuvassa 27 on esitetty jäässä olevan kerroksen moduulit eri rakenteilla. Moduuli vaihtelee hieman alle  $100 \text{ MN/m}^2$ :sta runsaaseen  $300 \text{ MN/m}^2$ :iin, jopa  $500 \text{ MN/m}^2$ :iin. Periaatteessa veden pinnan tasolla ei pitäisi olla vaikutusta moduuleihin, jos oletetaan, että vettä ei imeydy jäätyneeseen kerrokseen. Jäätyneen kerroksen moduulin tulisi myös olla sama eri kentissä samanaikaisissa mittauksissa.

Erot voivat aiheutua jäätyneen kerroksen paksuuden vaihteluista. Kerroksen paksuutta tarkkailtiin altaan alueella yhdestä routaputkesta. Sulamisvaiheessa jäätyneen kerroksen yläpinta on epätasainen. Altaan keskellä päällysteen tumma pinta imee lämpöä ja sulattaa routaa enemmän kuin altaan reunalla, jossa päällysteen päällä oli polannetta, eikä rakenne imenyt yhtä paljon lämpöä. Jäätyneen kerroksen paksuutta tulisikin myöhemmissä tutkimuksissa havainnoida tarkemmin useampien routaputkien ja maatutkan avulla.

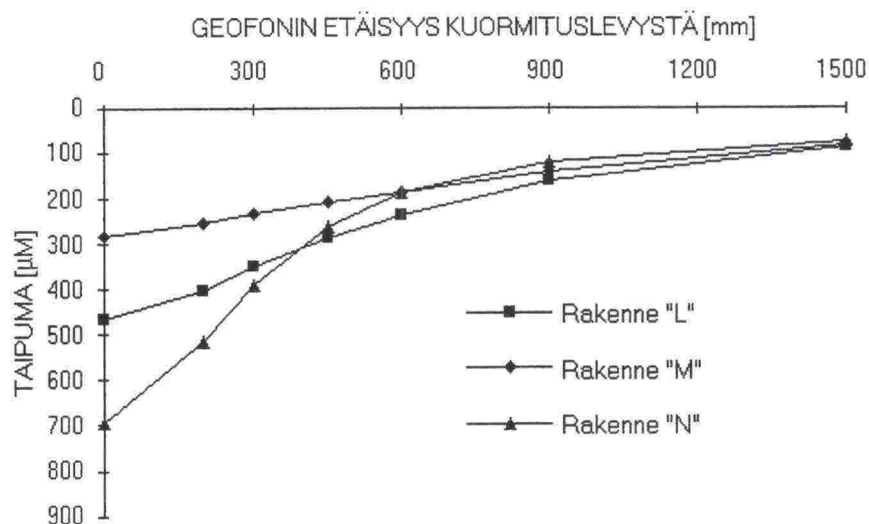


Kuva 27: Jäätyneen kerroksen moduulit eri rakenteilla.

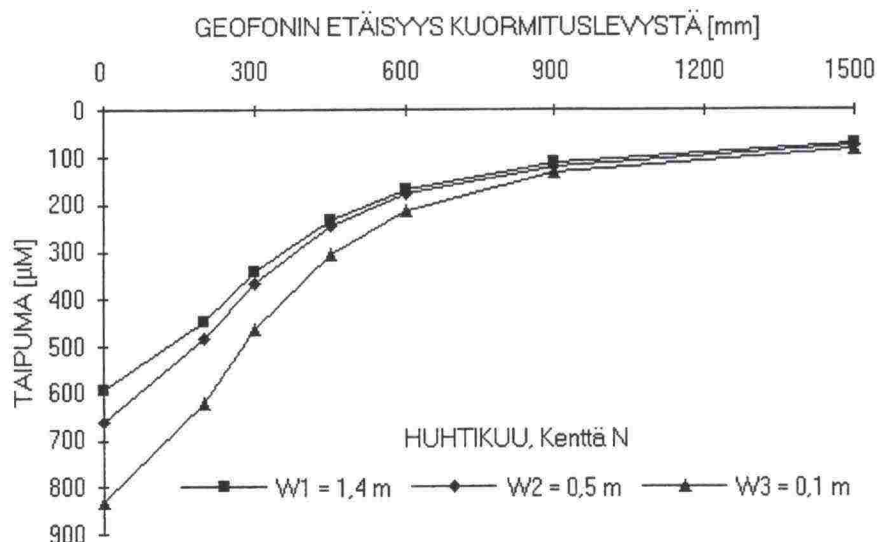
Erot jäätyneen kerroksen takaisinlasketussa moduulissa voivat johtua myös jäätyneen kerroksen erilaisesta jännitystasosta eri rakenteissa ja eri veden pinnan korkeuksilla. Jäätyneen kerroksen jännitysriippuvuudesta ei ole tietoa. Rakenteen kerrosmoduulit muodostavat kokonaisuuden: kun yhden kerroksen moduulin arvo muuttuu, muiden kerrosten moduuli muuttuu juuri jännitysriippuvuuden seurauksena.

Kuvassa 28 on esitetty keskimääräiset mitatut taipumasuppilot kussakin kentässä. Taipuma kunkin anturin kohdalla on keskiarvo neljän mittauspisteen arvoista kolmella eri veden pinnan tasolla, ts. kahdentoista mittauksen keskiarvo. Kuvasta nähdään selvästi erot eri rakenteiden käyttäytymisessä. Tämä nähtiin myös maaliskuun mittausten yhteydessä (kuva 17).

Kuvassa 29 on esitetty ohuen AB-rakenteen ("N") mitatut taipumasuppilot eri veden pinnan tasoilla. Taipuma kunkin anturin kohdalla on keskiarvo neljän mittauspisteen arvoista. Taipumasuppilot ovat järkevän muotoisia ja suurin taipuma syntyy ylimmällä veden pinnan tasolla. Tästä huolimatta takaisinlasketussa pohjamaan moduulissa esiintyy epä johdonmukaista vaihtelua eri veden pinnan korkeuksilla. Syynä tähän voi olla mitattujen taipumien ja sitä kautta takaisinlaskettujen moduulien melko suuri vaihtelu (liite 3).



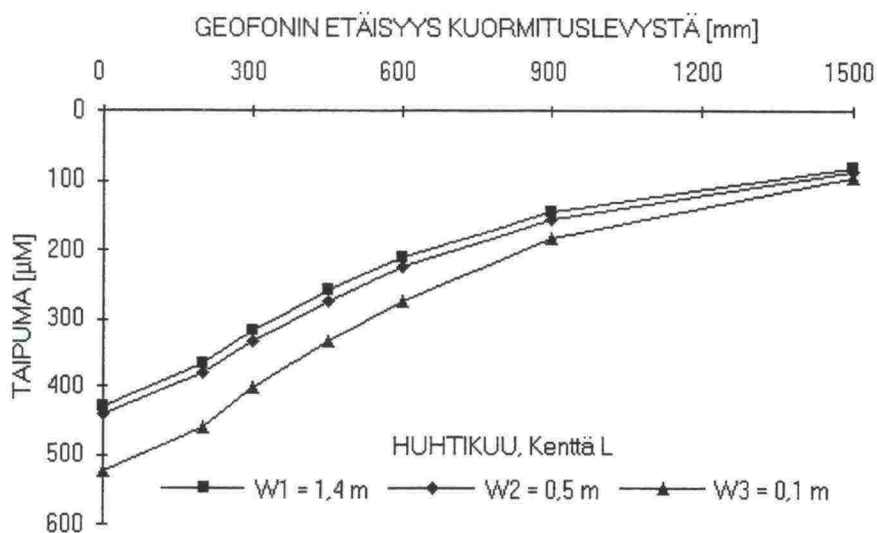
Kuva 28: Keskimääräiset taipumasuppilot eri rakenteille huhtikuussa.



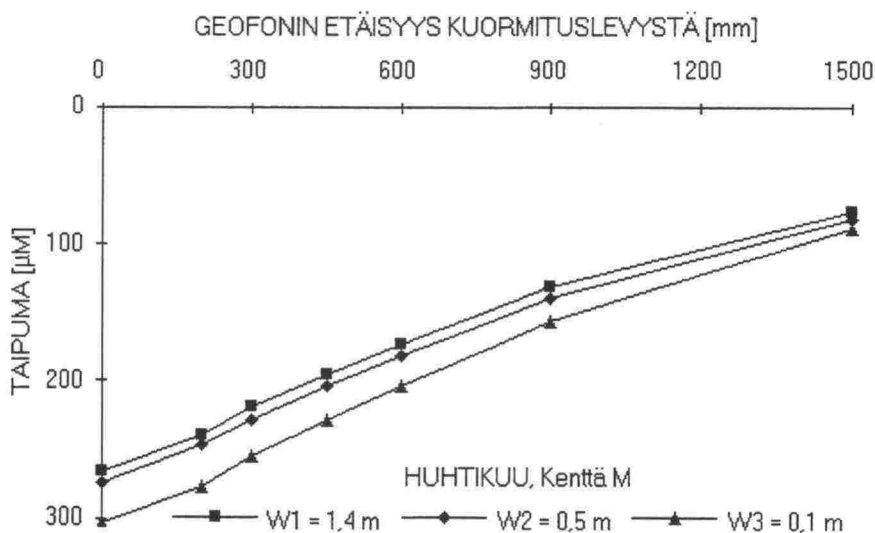
Kuva 29: Ohuen AB-rakenteen ("N") taipumasuppilot eri pohjaveden korkeuksilla huhtikuussa.

Kuvissa 30 ja 31 on esitetty vastaavat taipumasuppilot paksulle AB-rakenteelle ("L") ja maabetonirakenteelle ("M"). Kaikista kolmesta kuvasta nähdään, että taipumat kahdella alimmalla veden pinnan tasolla ovat suunnilleen samansuuruisia, mutta selvästi suurempia ylimmällä veden pinnan tasolla. Tulos on johdonmukainen, sillä kahdella alimmalla veden pinnan tasolla jäätyneen kerroksen yläpuolinen (kantava) kerros on kuiva ja ylimmällä veden pinnan tasolla täysin vedellä kyllästetty. Vedellä kyllästetyn materiaalin kyky vastustaa muodonmuutoksia pienenee voimakkaasti.





Kuva 30: Paksun AB-rakenteen ("L") taipumasuppilot eri pohjaveden korkeuksilla huhtikuussa.



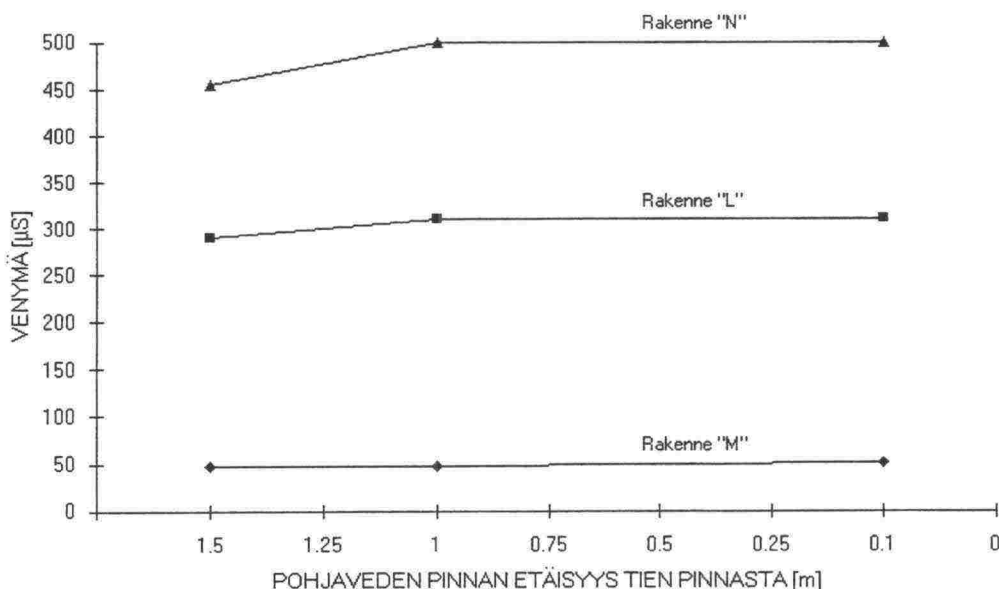
Kuva 31: Maabetonirakenteen ("M") taipumasuppilot eri pohjaveden korkeuksilla huhtikuussa.

### 3.2 Pohjaveden pinnan tason vaikutus tierasitukseen korkeassa lämpötilassa

Mittaukset tehtiin elokuussa 1992, jolloin päällysteen lämpötila oli 20 - 23 °C. Mittaukset tehtiin altaan ollessa kuivana (W0), veden pinnan ollessa 1,0 m (W1) ja 0,1 m (W3) päällysteen pinnasta.

### 3.2.1 Kuormituksena auto

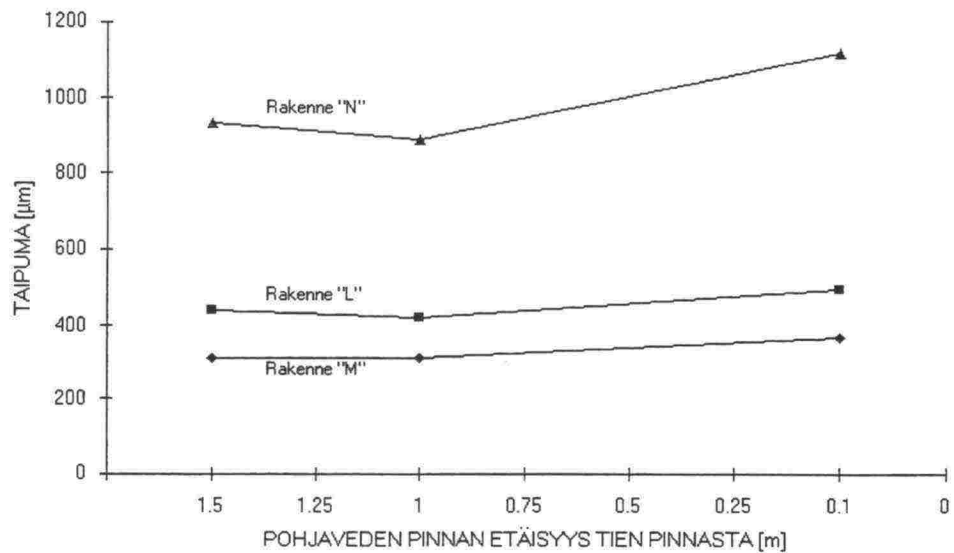
Kuvassa 32 on esitetty venymä sidotun kerroksen alapinnassa vedenpinnan korkeuden funktiona. Vedenpinnan korkeuden vaikutus venymiin on pieni ja muutos tapahtuu jo ensimmäisen vedenpinnan noston jälkeen. Venymät kasvavat 5 - 10 %.



Kuva 32: Venymät sidottujen kerrosten alapinnassa eri rakenteilla elokuussa. Kuormituksena auto.

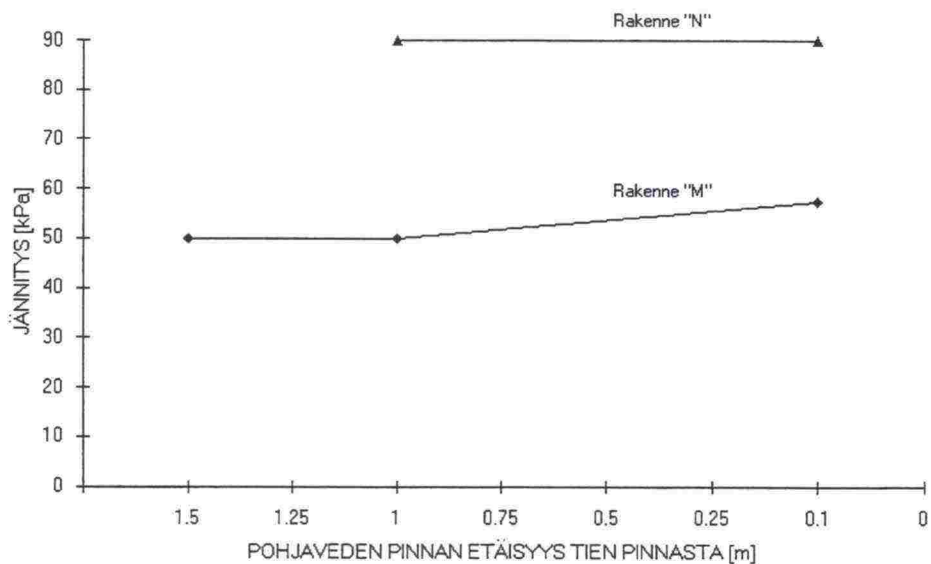
Mitatuista venymistä yleisesti käytetyillä väsymissuorilla eri rakenteille määritetyt kuormituskertaluvut suhtautuvat lähes samalla tavalla kuin Tielaitoksen suunnitteluohjeen perusteella määritetyt. Juuri käytetyille materiaaleille ei ole tarkkoja laboratoriossa määritettyjä moduuleita eikä väsymissuoria, mutta ohjearvot ovat suuntaa antavina tarpeeksi tarkkoja tähän tarkasteluun.

Kuvassa 33 on esitetty tienpinnan taipumat vedenpinnan korkeuden funktiona. Ohuella AB-rakenteella ("N") ensimmäisellä vedenpinnan nostolla ei ole merkittävää vaikutusta, mutta toinen lisää taipumaa 20 %. Paksu AB-rakenne ("L") käyttäytyy vastaavasti, mutta lisäys on 13 %. Maabetonirakenteella ("M") ei ensimmäinen vedenpinnan nosto vaikuta mitään, mutta toinen vedenpinnan nosto lisää taipumaa 18 %.



Kuva 33. Päällysteen pinnan taipumat eri rakenteilla elokuussa. Kuormituksena auto.

Kuvassa 34 on esitetty vedenpinnan korkeuden vaikutus sitomattomien kerrosten jännityksiin. Jännitykset on mitattu ohuella AB-rakenteella ("N") hiekkakerroksessa ja maabetonirakenteella ("M") murskekerroksessa. Paksulla AB-rakenteella ("L") ei ole mittauksia ja ohuella "L" vain kahdella ylimmällä vedenpinnan tasolla. Ohuella AB-rakenteella ("N") ei vedenpinnan nosto aiheuttanut muutoksia jännityksiin. MB-rakenteella lisäsi toinen vedenpinnan nosto jännityksiä 15 %.



Kuva 34: Jännitykset sitomattomissa kerroksissa eri rakenteilla elokuussa. Kuormituksena auto.



Edellä on esitetty tuloksia pohjaveden pinnan korkeuden vaikutuksesta tierasituksiin korkeassa lämpötilassa. Aikaisemmassa tutkimuksessa on tehty vastaavia mittauksia lähellä nollaa olevissa lämpötiloissa. Seuraavassa yhteenvedossa on esitetty lämpötilan vaikutusta tierasituksiin eri pohjaveden pinnan tasoilla. Noin 10 °C lämpötilassa olevat arvot on otettu roudan sulamisen simuloinnin yhteydessä tehdyistä mittauksista. Mittaukset on tehty eri vuosina ja eri vuodenaikoina ja lisäksi lämpötilassa +12 °C rakenteessa on routakerros.

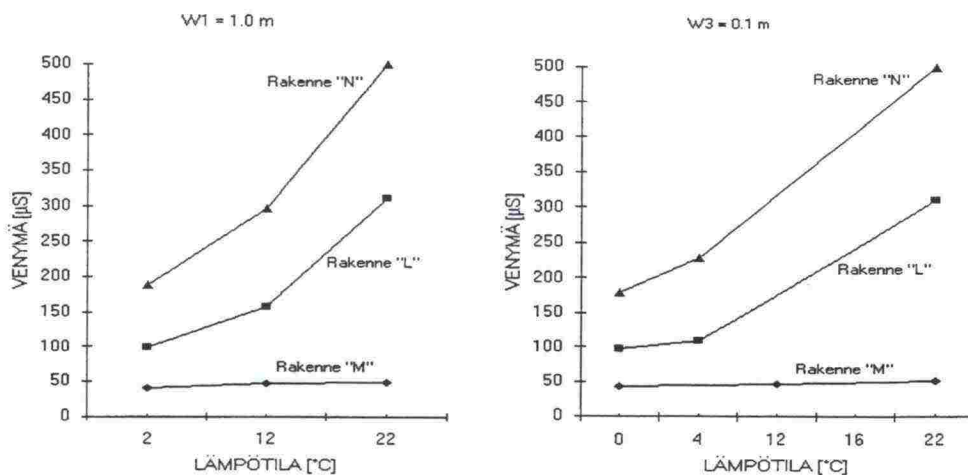
Kaikissa kolmessa mittauksessa ei ole ollut kaikissa lämpötiloissa täysin kattavasti käytössä samat anturit ja samat vedenpinnan korkeudet, joten tulokset ovat vain suuntaa-antavia. Esimerkiksi pohjaveden pinnan tasolla W1 = 1.0 m tien pinnasta ei ollut noin 10 °C lämpötilassa tehtyjä mittauksia, joten siinä esitetyt 12 °C:n lämpötilassa olevat arvot ovat tilanteesta, jolloin vedenpinta oli 0,2 m alempana eli 1.3 m tien pinnasta. Lisäksi tyhjän altaan mittaukset on em. puutteellisuuksien vuoksi jätetty pois yhteenvedosta.

Kuvan 35 vasemman puoleisessa käyrästössä on esitetty lämpötilan vaikutus kuormituksen aiheuttamiin sidotun kerroksen alapinnan venymiin vedenpinnan ollessa tasolla W1 = 1.0 m tien pinnasta. Venymät on mitattu lämpötiloissa +2°C, +12°C ja +22°C.

Ohuella AB-rakenteella ("N") venymät kasvoivat lämpötilan noustessa 2 °C:sta 12 °C:een 60 % ja edelleen 12 °C:sta 22 °C:een 70 %. Paksulla AB-rakenteella ("L") vastaavat luvut olivat 60 % ja lähes 100 %. Maabetonirakenteella ("M") venymän lisäys lämpötilan kohoamisen seurauksena jäi huomattavasti pienemmäksi ollen vastaavasti vain 15 % ja 5 %.

Kuvan 35 oikean puoleisessa käyrästössä on esitetty lämpötilan vaikutus kuormituksen aiheuttamiin sidotun kerroksen alapinnan venymiin vedenpinnan ollessa tasolla W3 = 0.1 m tien pinnasta. Venymät on mitattu lämpötiloissa ±0°C, +4°C, +12°C ja +22°C.

Ohuella AB-rakenteella ("N") venymät kasvoivat ensimmäisen neljän asteen (0°C → 4°C) lämpötilan nousun vaikutuksesta 30 % ja toisen kahdeksantoista asteen (4°C → 22°C) lämpötilan nousun vaikutuksesta edelleen 120 %. Paksulla AB-rakenteella ("L") vastaavat vaikutukset olivat 10 % ja 190 %. Maabetonirakenteella ("M") venymän lisäys jäi huomattavasti pienemmäksi ollen ensimmäisellä kahdentoista asteen (0 → 12) lämpötilan muutoksella vain 7 % ja toisella kymmenen asteen (12 → 22) muutoksella 10 %.



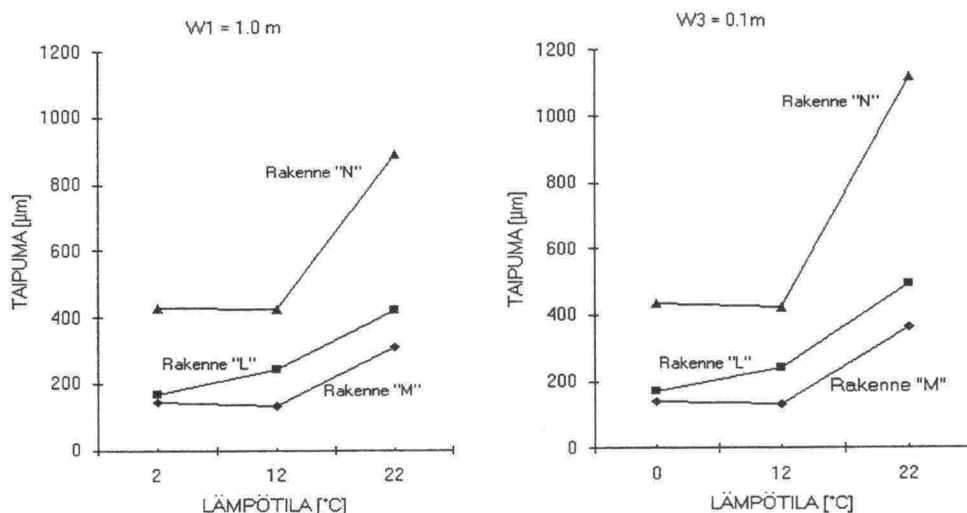
Kuva 35: Venymät sidottujen kerrosten alapinnassa eri rakenteilla päällysteen lämpötilan funktiona. Kuormituksena auto.

Huom. 12 °C lämpötilassa rakenteissa routakerros.

Kuvan 36 vasemman puoleisessa käyrästössä on esitetty lämpötilan vaikutus kuormituksen aiheuttamiin tienpinnan taipumiin vedenpinnan ollessa tasolla  $W1 = 1.0$  m tien pinnasta. Taipumat on mitattu lämpötiloissa  $+2^{\circ}\text{C}$ ,  $+12^{\circ}\text{C}$  ja  $+22^{\circ}\text{C}$ .

Ohuella AB-rakenteella ("N") taipumat kasvoivat ensimmäisen kymmenen asteen lämpötilan nousun ( $2 - 12^{\circ}\text{C}$ ) vaikutuksesta 0 % ja toisen kymmenen asteen lämpötilan nousun ( $12 - 22^{\circ}\text{C}$ ) vaikutuksesta 110 %. Paksulla AB-rakenteella ("L") vastaavat vaikutukset olivat 45 % ja 75 %. Maabetonirakenteella ("M") taipuma pienentyi ensimmäisestä kymmenen asteen lämpötilan noususta huolimatta noin 10 % ja kasvoi toisen kymmenen asteen lämpötilan nousun vaikutuksesta 120 % alkuperäisestä arvosta.

Kuvan 36 oikean puoleisessa käyrästössä on esitetty lämpötilan vaikutus kuormituksen aiheuttamiin tienpinnan taipumiin vedenpinnan ollessa tasolla  $W3 = 0.1$  m tien pinnasta. Taipumat on mitattu lämpötiloissa  $\pm 0^{\circ}\text{C}$ ,  $+12^{\circ}\text{C}$  ja  $+22^{\circ}\text{C}$ .



Kuva 36: Päällysteen pinnan taipumat eri rakenteilla lämpötilan funktiona. Kuormituksena auto.

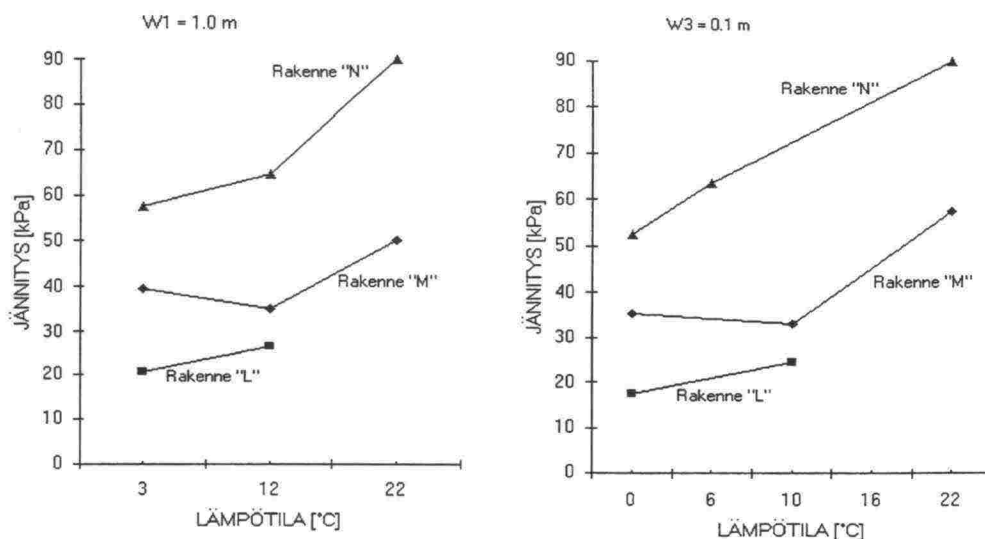
Huom. 12 °C lämpötilassa rakenteessa routakerros.

Ohuella AB-rakenteella ("N") taipumat kasvoivat ensimmäisen kahdentoista asteen lämpötilan nousun (0 - 12 °C) vaikutuksesta 0 % ja toisen kymmenen asteen lämpötilan nousun (12 - 22 °C) vaikutuksesta 160 %. Paksulla AB-rakenteella ("L") vastaavat vaikutukset olivat 45 % ja 100 %. Maabetonirakenteella ("M") taipuma pienentyi ensimmäisestä kahdentoista asteen lämpötilan noususta huolimatta 5 % ja kasvoi toisen kymmenen asteen lämpötilan nousun vaikutuksesta 160 % alkuperäisestä arvosta.

Kuvan 37 vasemman puoleisessa käyrästössä on esitetty lämpötilan vaikutus kuormituksen aiheuttamiin sitomattomien kerrosten jännityksiin vedenpinnan ollessa tasolla  $W1 = 1.0 \text{ m}$  tien pinnasta. Jännitykset on mitattu lämpötiloissa +3°C, +12°C ja +22°C.

Ohuella AB-rakenteella ("N") jännitykset kasvoivat ensimmäisen yhdeksän asteen lämpötilan nousun (3 - 12 °C) vaikutuksesta 10 % ja toisen kymmenen asteen lämpötilan nousun (12 - 22 °C) vaikutuksesta 40 %. Paksulla AB-rakenteella ("L") jännitykset kasvoivat ensimmäisen yhdeksän asteen lämpötilan nousun vaikutuksesta vain 5 % ja toisen lämpötilan nousun vaikutusta ei saatu näkyviin vähäisen mittaussaineiston takia. Maabetonirakenteella ("M") jännitykset pienentyivät ensimmäisestä yhdeksän asteen lämpötilan noususta huolimatta 10 % ja kasvoivat toisen kymmenen asteen lämpötilan nousun vaikutuksesta noin 30 % alkuperäisestä arvosta.





Kuva 37: Jännitykset sitomattomissa kerroksissa eri rakenteilla lämpötilan funktiona. Kuormituksena auto.

Huom! 12 °C lämpötilassa rakenteessa routakerros.

Kuvan 37 oikean puoleisessa käyrästä on esitetty lämpötilan vaikutus kuormituksen aiheuttamiin sitomattomien kerrosten jännityksiin vedenpinnan ollessa tasolla  $W3 = 0.1$  m tien pinnasta. Jännitykset on mitattu lämpötiloissa  $\pm 0^\circ\text{C}$ ,  $+6^\circ\text{C}$ ,  $+10^\circ\text{C}$  ja  $+22^\circ\text{C}$ .

Ohuella AB-rakenteella ("N") jännitykset kasvoivat ensimmäisen kuuden asteen lämpötilan nousun ( $0 - 6^\circ\text{C}$ ) vaikutuksesta 20 % ja toisen kuudentoista asteen lämpötilan nousun ( $6 - 22^\circ\text{C}$ ) vaikutuksesta 40 %. Paksulla AB-rakenteella ("L") jännitykset kasvoivat ensimmäisen kymmenen asteen lämpötilan nousun ( $0 - 10^\circ\text{C}$ ) vaikutuksesta 40 %. Toisen lämpötilan nousun vaikutusta ei saatu näkyviin vähäisen mittausaineiston takia. Maabetonirakenteella ("M") taipuma pienentyi ensimmäisestä kymmenen asteen lämpötilan noususta ( $0 - 10^\circ\text{C}$ ) huolimatta noin 5 % ja kasvoi toisen kahdentoista asteen ( $10 - 22^\circ\text{C}$ ) lämpötilan nousun vaikutuksesta noin 60 % alkuperäisestä arvosta.

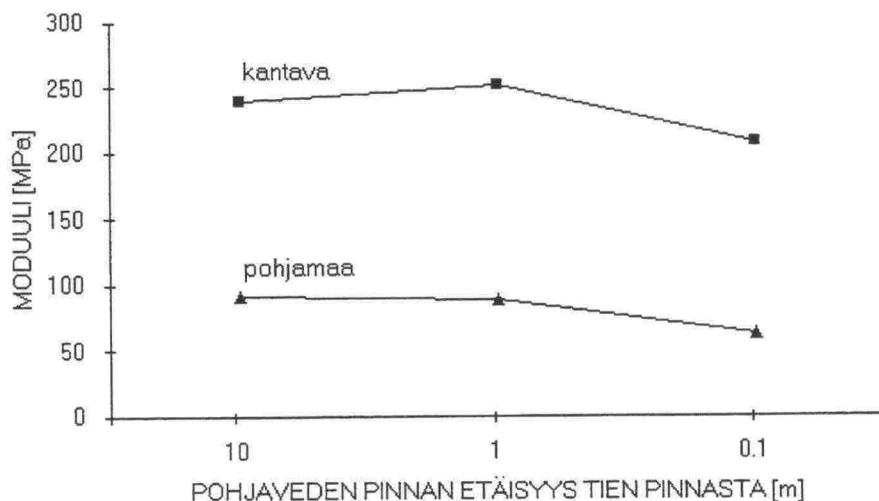
Edellä esitettyjä tierasitusten lämpötilariippuvuuksia eri pohjaveden pinnan tasoilla on pidettävä vain suuntaa-antavina, koska osa mittauksista (noin  $+10^\circ\text{C}$ :n lämpötilassa) on suoritettu roudan sulamisen simuloinnin yhteydessä, jolloin osa rakenteesta on ollut jäässä ja muu osa mittauksista on roudattomista olosuhteista. Tästä syystä varsinkin maabetonirakenteen taipumat ja jännitykset ovat pienentyneet ensimmäisestä lämpötilan kohoamisesta huolimatta.

### 3.2.2 Kuormituksena pudotuspainolaite

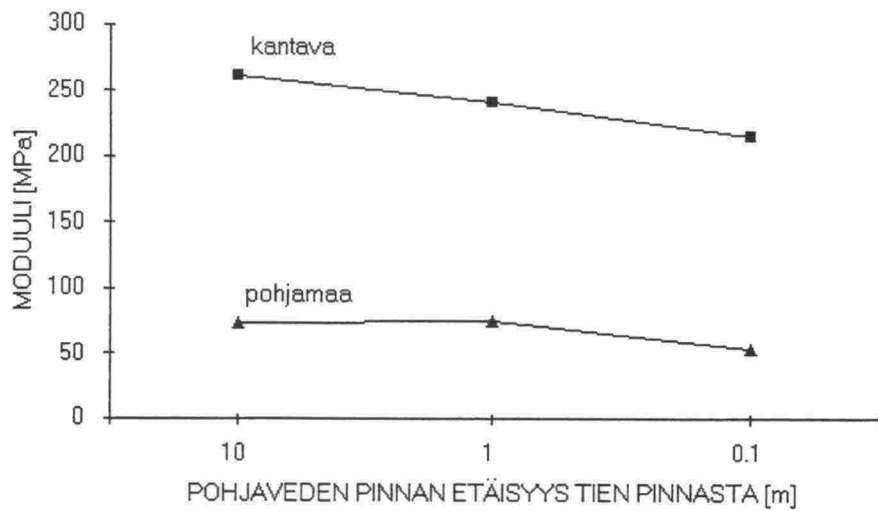
Pudotuspainomittaukset ja niiden tulosten käsittely suoritettiin samaan tapaan kuin roudan simulointitutkimuksessa, kts. luku 3.121. Bitumilla sidotut kerrokset on käsitelty yhtenä kerroksena. Maabetoni on käsitelty omana kerroksenaan. AB-rakenteilla kantavan kerroksen kalliomurske on käsitelty omana kerroksenaan. Pohjamaa on alin kerros. Näin kaikki rakenteet on käsitelty kolmikerrosrakenteina. Liitteissä 4/1 - 3 on esitetty kerrosmoduulin vaihtelu mittauspisteittäin elokuun mittauksissa. Hajonta takaisinlasketuissa kerrosmoduuleissa on hyvin pientä.

Kuvassa 38 on esitetty ohuen AB-rakenteen ("N") sitomattomien kerrosten laskelmien tulokset. Veden nosto 1,0 m päähän tien pinnasta ei vielä vaikuta moduuleihin juuri mitään. Veden nosto lähes tien pintaan pudottaa sekä kantavan kerroksen että pohjamaan moduulia noin 20 %.

Tämä on johdonmukaista, sillä vasta ylimmällä veden pinnan tasolla (W3) kantava kerros on veden kyllästämä, jolloin sen moduuli pienenee, ts. sen kyky vastustaa muodonmuutoksia heikkenee. Veden pinnan tasolla W1 ylin puoli metriä pohjamaasta on kuivaa, sitten on puoli metriä vedellä kyllästettyä pohjamaata ja taas altaan alla kuivaa pohjamaata. Näin pohjamaan moduuliarvo ei vielä juurikaan laske ensimmäisen veden pinnan noston seurauksena. Liikennekuormituksen ja pudotuspainolaitteen kuormituksen vaikutus ulottuu huomattavasti altaan pohjan (syvyys 1,5 metriä) alapuolelle. Paksun AB-rakenteen ("L") tulokset ovat saman suuntaisia, mikä onkin oletettavaa (kuva 39).

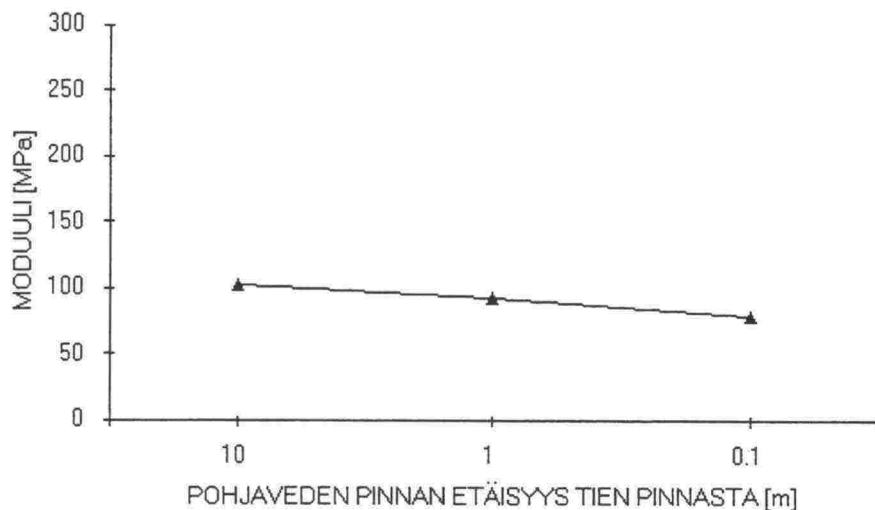


Kuva 38: Sitomattomien kerrosten moduulit elokuussa ohuella AB-rakenteella ("N").



Kuva 39: Sitomattomien kerrosten moduulit elokuussa paksulla AB-rakenteella ("L").

Kuvassa 40 on esitetty MB-rakenteen ("M") hiekan moduuli veden pinnan korkeuden funktiona. Veden nosto pienentää moduulia, mutta hieman vähemmän kuin muilla rakenteilla. Taso on myös hieman suurempi. Jäykän rakenteen alla pohjamaan moduulivaihtelu on pienempää, koska jännitystaso on pienempi. Moduulin korkeampi taso aiheutuu siitä, että maabetonirakenteella pohjamaahan kuuluu maabetonin alla sijaitseva 100 mm kerros kalliomursketta.

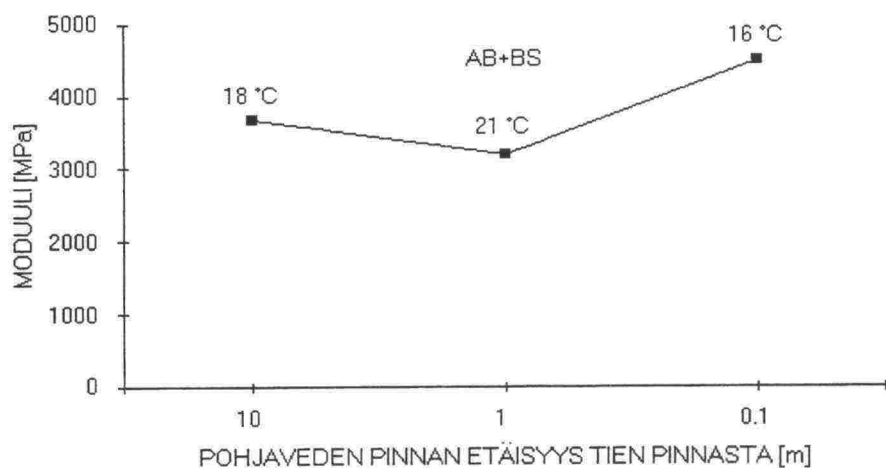


Kuva 40: Pohjamaan moduuli elokuussa MB-rakenteella ("M").

Ohuilla AB-rakenteilla (rakenteet "M" ja "N") asfaltin moduulin arvo kiinnitettiin  $3600 \text{ MN/m}^2$ :iin. Päällysteen lämpötila vaihteli elokuun mittauksissa välillä  $16 - +21^\circ\text{C}$ , eli oltiin lähellä vertailulämpötilaa. Moduulin arvo mittauslämpötilassa on valittu laskelmien perusteella. Paksun AB-rakenteen ("L") lasketut

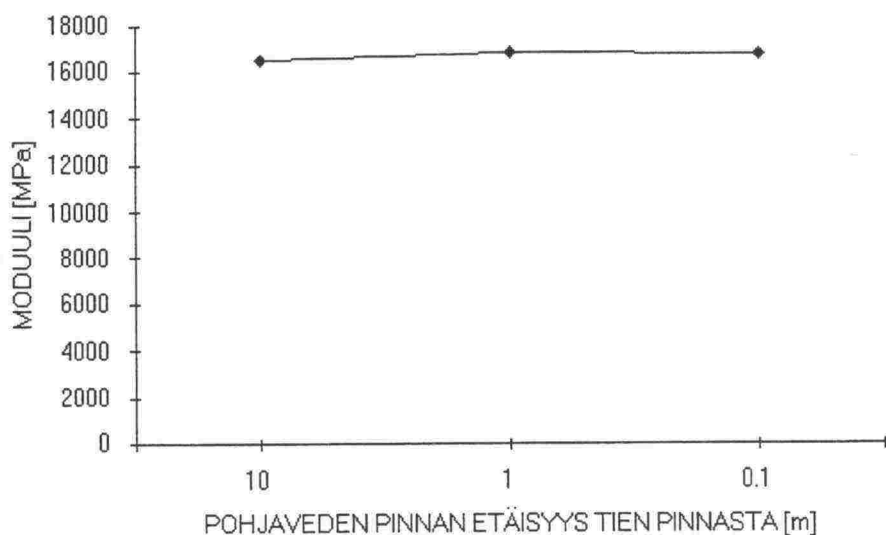


yhdistetyn AB- ja BS-kerroksen moduulit on esitetty kuvassa 41. Takaisinlasketuksessa moduuliarvossa esiintyy melko suurta vaihtelua.



Kuva 41: Sidotun kerroksen moduuli elokuussa paksulla AB-rakenteella ("L").

Kuvassa 42 on esitetty maabetonikerroksen takaisinlaskettu moduuliarvo. Vaihtelu on pientä, enimmilläänkin vain noin 2,5 %. Sekä asfaltin että maabetonin moduulin vaihtelun syitä veden pinnan korkeuden mukaan on pohdittu kohdassa 3.121 maaliskuun mittaustulosten käsittelyn yhteydessä.



Kuva 42: Maabetonin moduuli elokuussa MB-rakenteella ("M").

### 3.3 Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten välinen vertailu

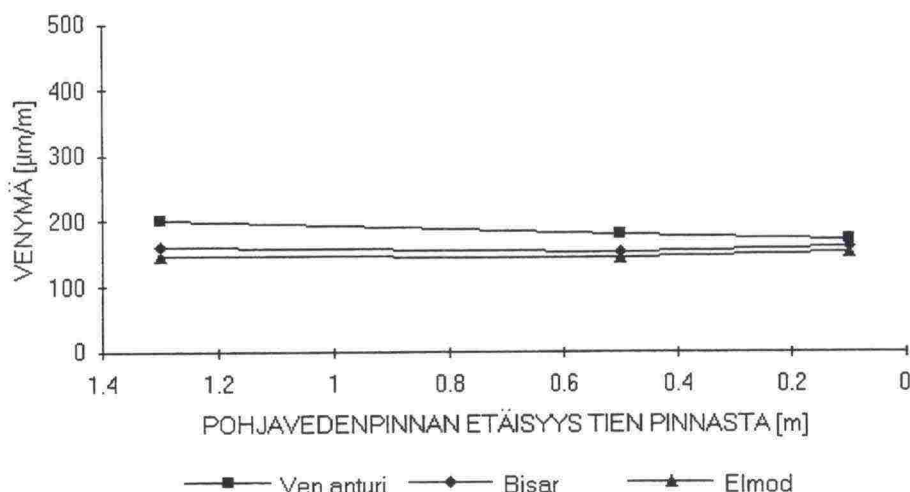
Mitattuja ja teoreettisesti laskettuja venymiä, taipumia ja jännityksiä verrattiin toisiinsa. Teoreettiset laskelmat tehtiin kahdella eri menetelmällä, lineaarisella monikerrosohjelmalla (BISAR) ja takaisinlaskentaohjelmalla (ELMOD).

Lähtötietoina Bisar-ohjelmaan käytettiin Modulus-ohjelmalla takaisinlaskettuja kerrosmoduulien arvoja ja samoja kerrospaksuuksia kuin takaisinlaskennassa. Elmod-ohjelmassa Boussinesqin yhtälöitä käytetään yhdessä Odemarkin vastinpaksuusteorian kanssa sekä moduulien takaisinlaskentaan että muodonmuutosten eteenpäinlaskentaan ohjelman itsensä laskemilla kerrosmoduulien arvoilla.

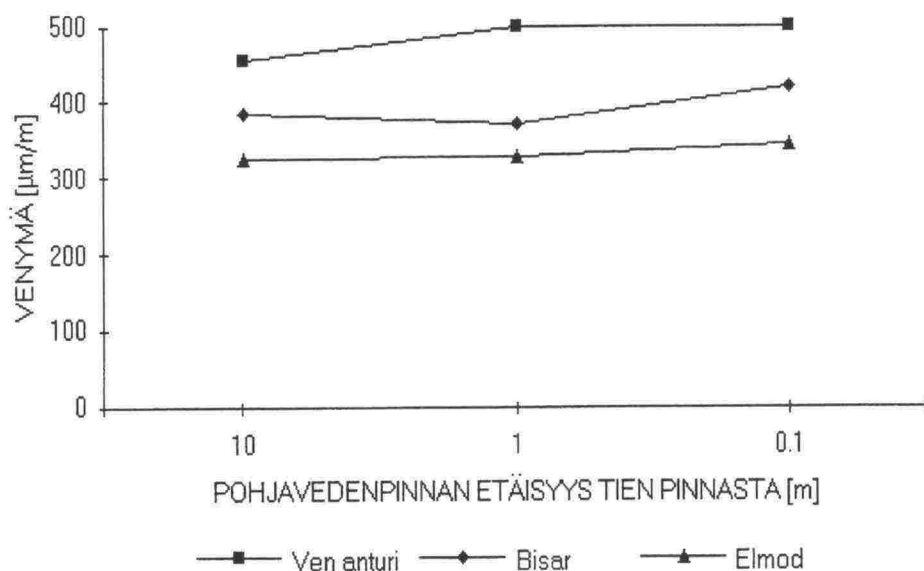
Venymien osalta on esitetty mitatun venymän lisäksi Bisar- ja Elmod-ohjelmilla lasketut sidotun kerroksen alapinnan pituussuuntaiset venymät. Mitatut venymät on johdettu eri kentissä 1 - 4 pituussuuntaisen venymäliuskan tuloksista. Taipumien osalta on esitetty yhdellä pohjavesialtaan pohjaan noin 1,5 metrin syvyyteen ulottuvalla taipumatangolla mitatun taipuman lisäksi pudotuspainolaitteella mitattu taipuma (FWD) ja takaisinlaskentatuloksista lineaarisella ohjelmalla laskettu taipuma.

Tässä yhteydessä on huomautettava, että antureilla ja taipumatangoilla mitatut venymät ja taipumat on mitattu liikkuvan pyöräkuorman alla eikä samanaikaisesti pudotuspainolaitteen kanssa. Tämä tarkoittaa sitä, että eri menetelmillä saaduissa tuloksissa havaitut erot voivat aiheutua mm. eroista kuorma-auton dynaamisessa akselipainossa. Auton pyörä voi tietyn anturin tai taipumatangon kohdalla olla liikkeessä joko ylös- tai alaspäin tien epätasaisuudesta johtuen, ts. dynaaminen akselipaino tietyn anturin kohdalla on tuntematon. Laskelmat tehtiin sekä maaliskuu-, huhti- että elokuun mittauksista kaikille kolmelle rakenteelle. Seuraavassa on esitetty tyypillisimmät tulokset ja pohdittu joitakin mahdollisia syitä saatuihin tuloksiin. Kaikki tulokset on esitetty liitteissä 5/1 - 5 maaliskuun mittauksista, liitteissä 6/1 - 5 huhtikuun ja liitteissä 7/1 - 4 elokuun mittauksista.

Kuvassa 43 on esitetty sidotun kerroksen alapinnan venymät paksulla AB-rakenteella ("L") huhtikuun mittauksissa ja kuvassa 44 ohuella AB-rakenteella ("N") elokuun mittauksissa. Kuvista nähdään, että molemmilla menetelmillä lasketut venymät vastaavat toisiaan, mutta mitattu venymä on suurempi kuin laskettu venymä. Lisäksi laskettu venymä kasvaa veden pinnan noustessa kun taas mitattu venymä pienenee.



Kuva 43: Venymät päällysteen alapinnassa (mitatut ja lasketut) huhtikuussa. Paksu AB-rakenne ("L").



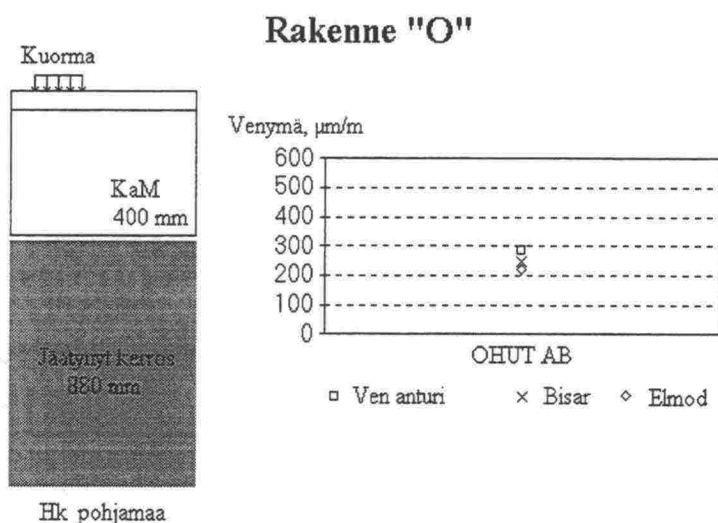
Kuva 44: Mitatut ja lasketut venymät päällysteen alapinnassa elokuussa. Ohut AB-rakenne ("N").

Tässä tutkimuksessa käytetyillä laskentamenetelmillä laskettuja venymiä on verrattu lähteessä /50/. Aineistona käytettiin SHRP-LTPP -koeteiltä kerättyjä pudotuspainomittausten tuloksia. Nähtiin, että lineaarisella menetelmällä ja Boussinesqin yhtälöillä lasketut venymät vastasivat hyvin toisiaan. Tämä on yhdenmukaista kuvissa 43-44 esitettyjen tulosten kanssa.

Virtaan koekentällä on mitattu asfaltin alapinnan venymiä myös pudotuspainolaitteen kuormituksesta /51/. Mitattujen ja laskettujen venymien on todettu vastaavan hyvin toisiaan. Maaliskuun mittausten yhteydessä tehtiin rakenteella "O" venymämittaus pudotuspainolaitteen kuormituksesta. Mittaukset tehtiin



veden pinnan korkeudella W3. Kuvassa 45 on esitetty mitatun ja Bisar- ja Elmod-ohjelmilla lasketun venymän vertailu sekä jäätyneen kerroksen asema rakenteessa mittausten aikana (vrt. kuva 3). Mitatut ja molemmilla ohjelmilla lasketut venymät vastaavat melko hyvin toisiaan. On huomattava, että laskelmissa käytetty asfaltin moduulin arvo vaikuttaa merkittävästi laskettuun venymään. Tässä laskelmassa käytettiin samaa arvoa ( $17\,000\text{ MN/m}^2 + 3\text{ }^{\circ}\text{C:ssa}$ ), jota on käytetty myös muissa maaliskuun mittauksista tehdyissä laskelmissa. Moduuliarvo on korkeahko; sen pienentäminen lisäisi laskettua venymää ja lähentäisi sitä edelleen mitattuun arvoon.



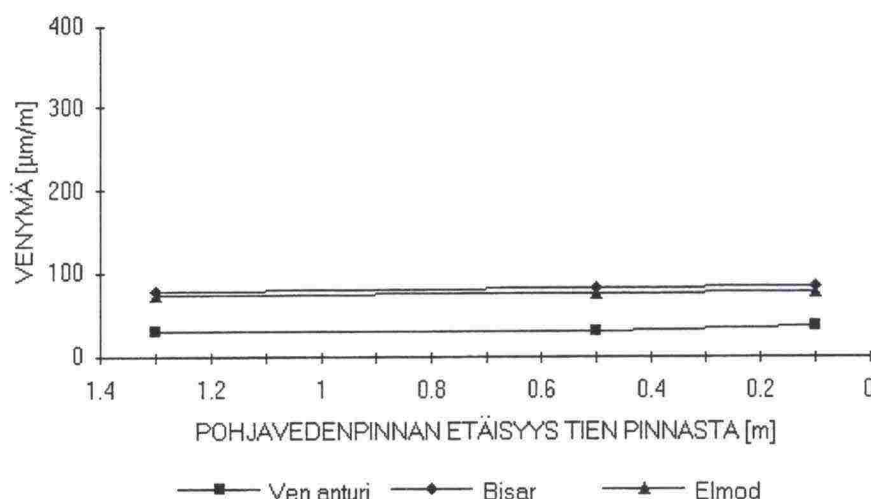
Kuva 45: Mitattu ja laskettu asfaltin venymä kentässä O (ohut AB) sekä jäätyneen kerroksen asema rakenteessa maaliskuun mittauksissa.

Kuvissa 43 ja 44 havaittava tasoero mitattujen ja laskettujen venymien välillä aiheutuu todennäköisesti kuorma-auton ja pudotuspainolaitteen kuormituksen eroavaisuuksista, mm. tien epätasaisuuden aiheuttamasta dynaamisesta lisäkuormasta kuorma-auton akselipainoon.

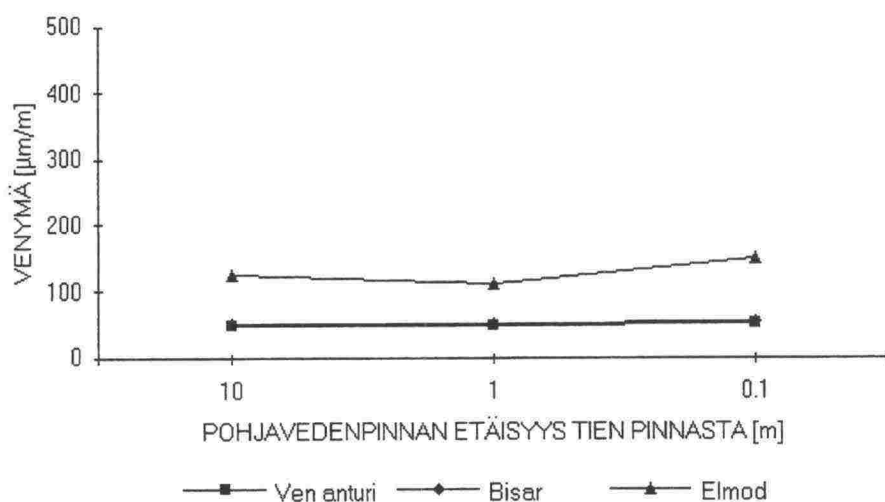
Tasoero voi aiheutua myös dynaamisen pudotuspainomittauksen staattisesta tulkinnasta. Pudotuspainolaite aiheuttaa tierakenteeseen dynaamisen kuormituksen, josta rakenteeseen aiheutuva taipuma vastaa dynaamisen liikennekuorman aiheuttamaa taipumaa, mutta on pienempi kuin vastaavan suuruisen staattisen kuormituksen aiheuttama taipuma. Takaisinlaskentaohjelmat yleensä, kuten myös molemmat tässä tutkimuksessa käytetyt takaisinlaskentaohjelmat, laskevat kuitenkin rakenteen muodonmuutosmoduulit ikäänkuin pudotuspainolaitteen tiehen kohdistama voima olisi staattinen. Tämä ilmeisesti suurentaa laskettuja moduuleja ja siten pienentää laskettuja venymiä. Todellisuudessa epälineaarisesti käyttäytyvien materiaalien mallintaminen

lineaarisesti voi myös suurentaa laskettuja kerrosmoduulien arvoja ja pienentää laskettuja venymiä.

Kuvissa 46 ja 47 on esitetty venymä maabetonin alapinnassa huhtikuun ja elokuun mittauksissa. Tasoero mitattuihin venymiin on päinvastainen kuin AB-rakenteilla. Ohjelmien laskema maabetonin moduuli huhtikuun mittauksissa on ilmeisesti liian pieni, jolloin laskettu venymä on suurempi kuin mitattu. Elokuun mittauksista Modulus-ohjelmalla takaisinlaskettu maabetonin moduuli (n. 16 000 MN/m<sup>2</sup>) vastaa maabetonin oletettua jäykkyyttä (vrt. kuva 42), jolloin myös laskettu ja mitattu venymä vastaavat erittäin hyvin toisiaan.



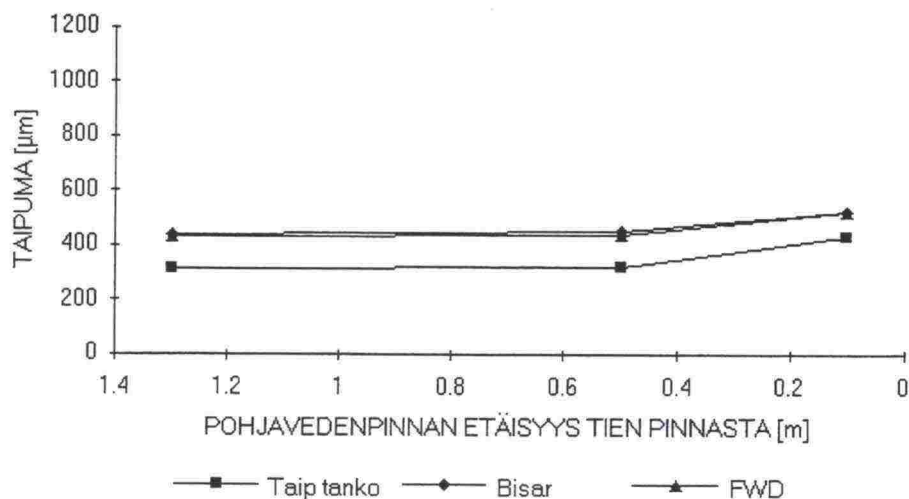
Kuva 46: Mitatut ja lasketut venymät maabetonin alapinnassa huhtikuussa MB-rakenteella ("M").



Kuva 47: Mitatut ja lasketut venymät maabetonin alapinnassa elokuussa MB-rakenteella ("M").

Kuvassa 48 on esitetty paksun AB-rakenteen ("L") taipuma suoraan kuormituksen alla huhtikuun mittauksissa. Kuvasta nähdään, että ensimmäinen

veden pinnan nosto lisää taipumaa jonkin verran mutta toinen veden pinnan nosto lisää taipumaa huomattavasti (vrt. kuva 11). Tämä on ymmärrettävää, sillä kahdella alimmalla veden pinnan tasolla jäätyneen kerroksen yläpuolinen kantava kerros on kuiva, mutta ylimmällä veden pinnan tasolla se on vedellä kyllästetty, jolloin sen kyky vastustaa muodonmuutoksia heikkenee voimakkaasti. Sama ilmiö on nähtävissä sekä taipumatankojen että pudotuspainolaitteen tuloksissa ja teoreettisesti lasketuissa taipumissa. Menetelmien välillä on kuitenkin tasoero siten, että taipumatangoilla mitattu taipuma on yleensä pienempi kuin muilla menetelmillä saatu taipuma.

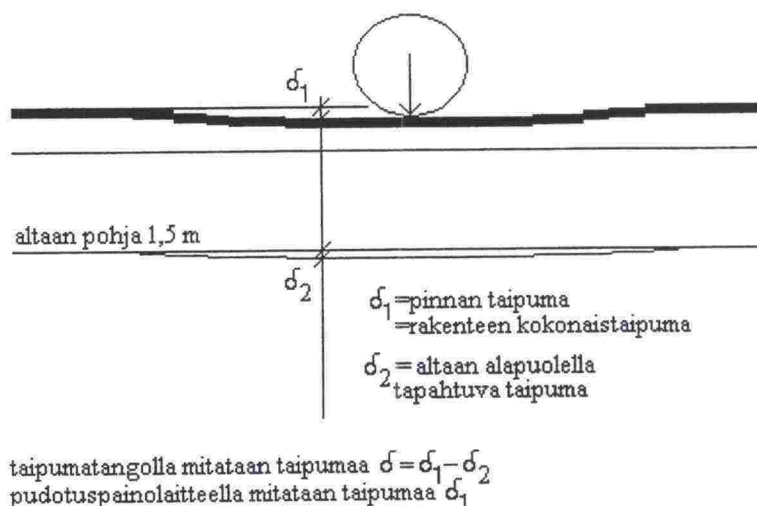


Kuva 48: Päälysteen pinnan mitatut ja lasketut taipumat huhtikuussa. Paksu AB-rakenne ("L").

Tasoeron voidaan tulkita aiheutuvan siitä, että taipumatangot ulottuvat pohjavesialtaan pohjaan. Ne siis mittaavat rakenteen taipumaa 1,3 metrin syvyyteen asti. Pudotuspainolaitteella mitataan rakenteen kokonaistaipumaa. Pudotuspainolaitteen ja pyöräkuorman kuormitusvaikutus ulottuu rakenteessa huomattavasti syvemmälle kuin 1,3 metriä. Tätä on havainnollistettu kuvassa 49.

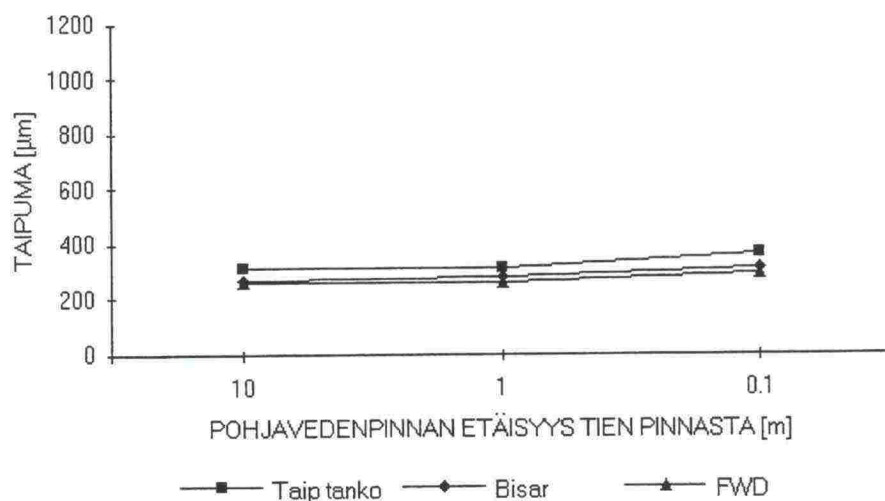
Altaan ulkopuolelle kenttään "O" on asennettu sekä 1,5 metrin että 6 metrin mittaiset taipumatangot. Rakenne on sama kuin kentässä "N" (vrt. kuva 1). Kuuden metrin syvyyteen ulottuvalla tangolla mitatut taipumat ovat olleet tehdyissä mittauksissa järjestelmällisesti useita kymmeniä prosentteja suurempia kuin 1,5 metrin syvyyteen ulottuvalla tangolla mitatut taipumat. Tämän tutkimuksen yhteydessä tehdyissä mittauksissa routakerroksen paksuus ja sijainti altaassa ja altaan ulkopuolella on kuitenkin erilainen, niin ettei mittaustuloksista voi johtaa muunnoskertoimia. Mittaukset kuitenkin osoittavat, että kuormitusvaikutus ulottuu rakenteessa huomattavasti syvemmälle kuin 1,5 metriä.





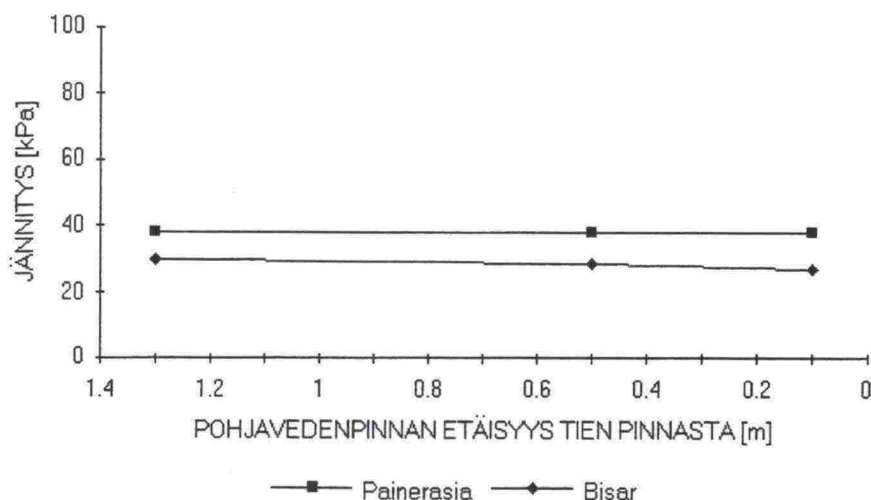
Kuva 49: Pyöräkuorman ja pudotuspainolaitteen kuormitusvaikutus ja taipumatangolla ja pudotuspainolaitteella mitattu taipuma.

Joissakin tapauksissa taipumatangoilla mitattu taipuma on saman suuruinen tai suurempi kuin pudotuspainolaitteella mitattu taipuma. Esimerkki tällaisesta laskelmasta on esitetty kuvassa 50.

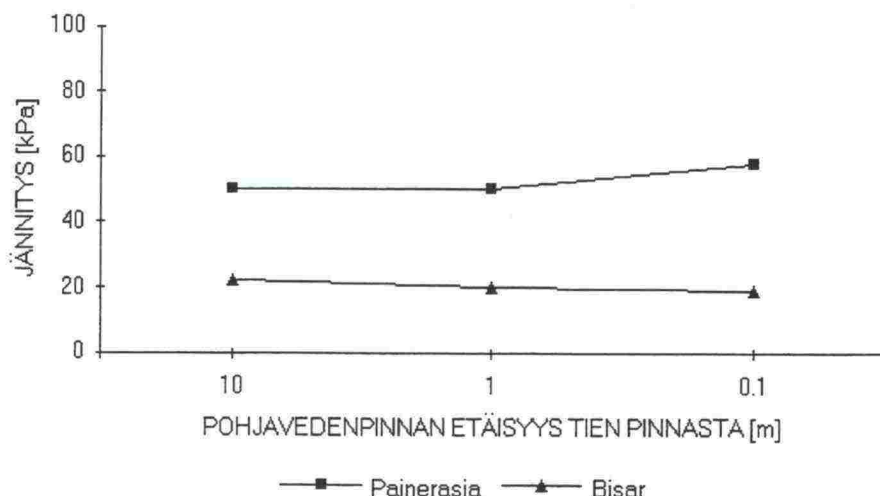


Kuva 50: Päällysteen pinnan mitatut ja lasketut taipumat elokuussa MB-rakenteella ("M").

Painerasioilla mitattuja ja Bisar-ohjelmalla laskettuja jännityksiä sitomattomassa kerroksessa on verrattu kuvassa 51 paksulle AB-rakenteelle ("L") ja kuvassa 52 maabetonirakenteelle ("M"). Paksulla AB-rakenteella ("L") mitatut ja lasketut jännitykset vastaavat melko hyvin toisiaan (kuva 51), mikä aiheutuu ilmeisesti siitä, että rakenne on "tavanomainen": Paksujen sidottujen kerrosten alla on murskekerros ja pohjamaa. Maabetonirakenteella (kuva 52) ja ohuella AB-rakenteella mitatut jännitykset ovat noin kaksinkertaisia verrattuna laskettuihin jännityksiin.



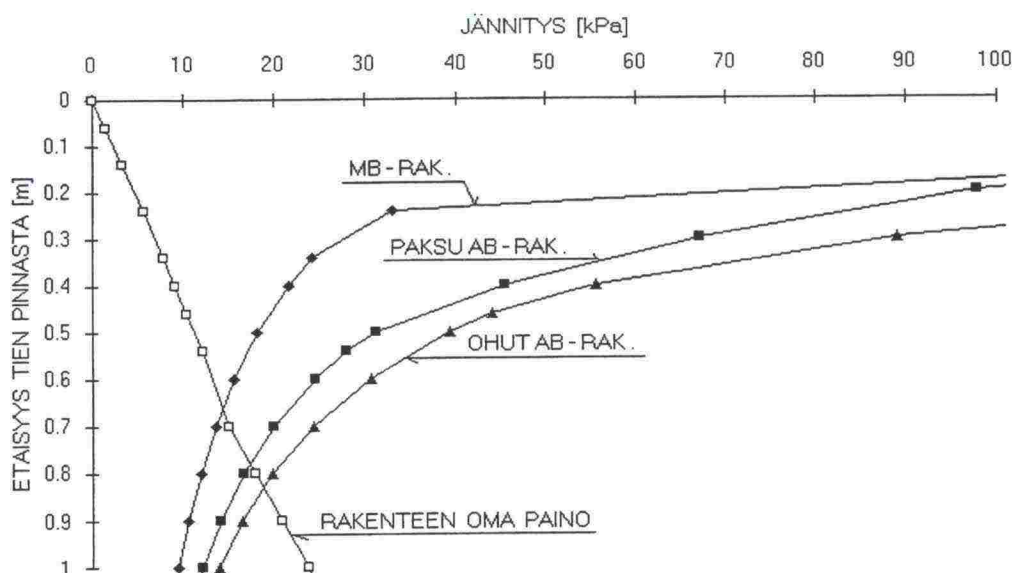
Kuva 51: Mitatut ja lasketut jännitykset sitomattomissa kerroksissa huhti-kuussa paksulla AB-rakenteella ("L").



Kuva 52: Mitatut ja lasketut jännitykset sitomattomissa kerroksissa elo-kuussa MB-rakenteella ("M").

Jatkotutkimuksilla tulee selvittää tarkemmin pudotuspainolaitteen mittaustuloksista laskettujen venymien ja venymäliuskoilla mitattujen venymien välinen yhteys. Tämä edesauttaa analyttisten mitoitusmenetelmien kehittämis- ja tarkentamistyötä. Kentällä mitatut muodonmuutokset ovat luotettavia; mittaustekniikka hallitaan. Pudotuspainolaitteen tuloksista muodonmuutokset voidaan määrittää, ja tutkimustyötä tulee jatkaa, jotta tuloksista voidaan saada täysi hyöty. Pudotuspainolaitteen käyttö kriittisten muodonmuutosten määrittämiseen on kohtuullisen uusi alue, jolta ei ole vielä olemassa yhtä paljon tietoa kuin esimerkiksi Virttaan instrumentoiduista rakenteista. Virttaan rakenteet tarjoavat oivallisen mahdollisuuden pudotuspainolaitetulosten verifioimiseen.

Kuvassa 53 on esitetty Bisar-ohjelmalla lasketut standardi-pyöräkuorman (paripyörä, 50 kN, 700 kPa) aiheuttamat pystysuorat lisäjännitykset syvyyden funktiona eri rakenteille. Lisäksi kuvassa on laskettu rakenteen omasta painosta aiheutuva pystysuora staattinen jännitys.



Kuva 53: Bisar-ohjelmalla lasketut pyöräkuorman aiheuttamat jännitykset syvyyden funktiona eri rakenteille.

Maabetonirakenne jakaa kuormitusta tehokkaimmin ja kantavan kerroksen pintaan kohdistuu vain 5 % tien pintaan tulevasta kuormasta. Paksulla AB-rakenteella kantavan kerroksen pintaan kohdistuu vastaavasti 20 % ja ohuella AB-rakenteella 50 % pintakuormasta. Jos päällyste on ohut ja kantava kerros heikko, esim. veden päästessä rakenteeseen, tie saattaa vaurioitua erittäin nopeasti. Jo muutama raskas ajoneuvo saattaa aiheuttaa rakenteeseen haitallisia pysyviä muodonmuutoksia. Jäykemmillä rakenteilla (paksut sidotut kerrokset) vaurioituminen ei ole niin todennäköistä, koska jännityksen absoluuttiarvot ovat huomattavasti pienempiä. Jännitys sitomattomissa kerroksissa saattaa lisääntyä rakenteessa olevan veden takia suhteessa yhtä paljon kuin heikommillakin rakenteilla, mutta vaikutus kuormituskestävyyteen jää vähäiseksi, koska ei olla jännityksen kriittisellä tasolla.

Rakenteen omasta painosta aiheutuva jännitys on jo 1 m syvyydellä pinnasta suurempi kuin pyöräkuorman aiheuttama jännitys millään rakenteella.

### 3.4 Reunavaikutus

Reunalinjalla muodonmuutokset olivat 15 % pienempiä sekä pituus- että poikittaissuuntaisilla antureilla mitattuna. Tulokset olivat samansuuntaisia myös rakenteen ollessa jäässä ja päällysteen lämpötilan ollessa lähellä nollaa.



Odotus oli aivan päinvastainen. Kyseinen rakenne ei kuitenkaan ole tavanomainen tierakenne, koska AB:n jatkeena on sivulle päin noin 10 m:n levyinen MB-rakenne eli on todella tukeva reuna-tuki. Ehkäpä tulos onkin täten järkevä.

Samaa tukee nopeuden vaikutus. Kun nopeus putosi 50 km/h:sta 5 km/h:iin, kasvoivat venymät keskilinjalla pitkittäisillä antureilla 45 % ja poikittaisilla antureilla 150 %. Reunalinjalla muutokset olivat vastaavasti vain 40 % ja 60 %.

### 3.5 Huokosvedenpaineen mittaukset

Huokosvedenpaineen mittauksia dynaamisen kuormituksen vaikuttaessa rakenteeseen tehtiin huhtikuun mittauksen yhteydessä. Mittauksissa ei selvitetty staattista huokospainetta vaan sitä lisää huokospaineeseen, minkä liikkuva auto tierakenteeseen aiheuttaa. Mittaukset tehtiin ohuella AB-rakenteella ("N") sitomattomissa kerroksissa kahdella eri syvyydellä olevalla anturilla. Ylempi anturi (NH5) oli 0,2 m:n syvyydellä tien pinnasta ja alempi anturi (NH1) 1,2 m:n syvyydellä tien pinnasta.

Alempi mittausanturi sijaitsi routakerroksen alapuolella ja oli alimmalla vedenkorkeudella (XW4) 0,1 m pohjaveden pinnan yläpuolella. Ylempi mittausanturi oli vain ylimmällä vedenkorkeudella (XW6 ja XW7) pohjaveden pinnan alapuolella.

Taulukossa 1 on esitetty kolmella eri vedenpinnan korkeustasolla ja kuormittavan ajoneuvon ajonopeudella 50 km/h sekä yhdellä vedenpinnan korkeustasolla ja ajonopeudella 5 km/h mitatut huokosvedenpaineen lisät kunkin kuormittavan akselin kohdalta numeroituna siten, että 1 = etuakseli, 2 = vetoakseli (paripyörä) ja 3 = teliakseli (paripyörä). Akselipainot olivat 60, 105 ja 82 kN. Taulukossa on esitetty pohjaveden pinnan alapuolella mitattu huokosveden paineen arvo tummennetulla pohjalla.

*Taulukko 1: Huokosvedenpaineet huhtikuun mittauksissa.*

Vedenpinnan korkeustaso		Mitattu huokosvedenpaine antureittain ja akseleittain [Pa]						Käytetty ajonopeus [km/h]
		Anturi NH1 1,2 m pinnasta			Anturi NH5 0,2 m pinnasta			
Tunnus	Syvyys [m]	Kuormitusakseli			Kuormitusakseli			
		1 60 [kN]	2 105 [kN]	3 82 [kN]	1 60 [kN]	2 105 [kN]	3 82 [kN]	
XW6	0,1	176	493	441	709	853	669	50
XW5	0,5	123	346	314	658	765	659	50
XW4	1,3	18	73	59	155	247	215	50
XW7	0,1	115	166	121	466	621	439	5

Perinteisen maamekaniikan mukaan nopeassa kuormituksessa koko kuorma siirtyy huokospaineeksi, jos vesi ei pääse virtaamaan rakenteessa. Tällöin huokospaineen arvot olisivat kantavassa kerroksessa 1 - 2 dekadia suurempia kuin pohjamaassa.

Syvämmän anturin tulokset ovat mittausteknisesti luotettavampia kuin ylemmän anturin tulokset, koska ylemmän anturin päällä oli vettä vain muutama sentti. Tällöin huokospaine pääsi osittain purkautumaan ylöspäin vapaaseen huokostilaan. Syvämmällä kantavassa kerroksessa olisi todennäköisesti ollut korkeampia huokospaineen arvoja, mutta anturia ei saatu syvemmälle rakenteeseen, koska murske sortui tehtyyn reikään.

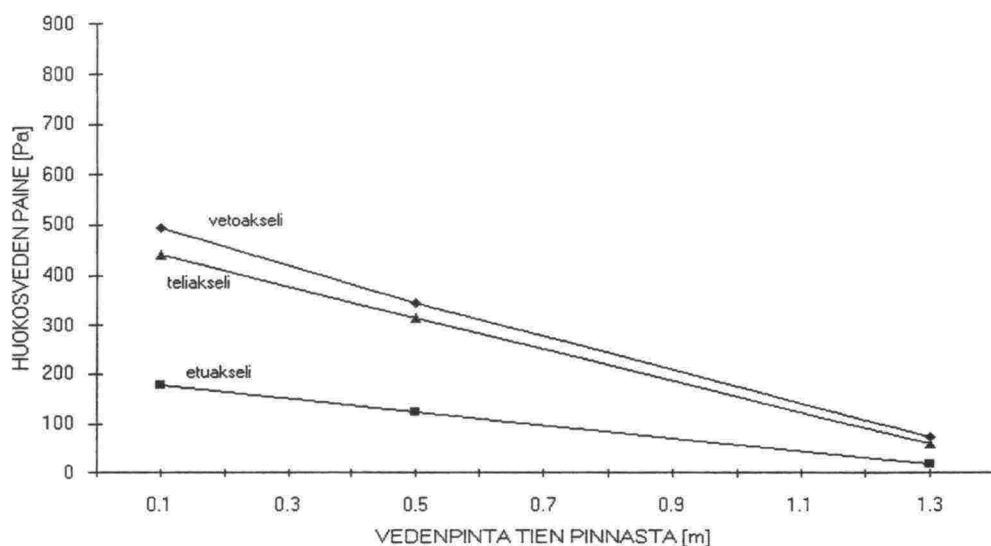
Nopeuden vaikutuksesta voidaan päätellä, että ainakin 5 km/h nopeudella vesi pääsee virtaamaan. Mitatut huokospaineen arvot ovat joka tapauksessa hyvin pieniä teoreettisiin verrattuna.

Huokosvedenpaineen arvot kasvoivat vedenpinnan korkeuden nousun mukana ja olivat huomattavasti suurempia lähellä pintaa kuin syvämmällä rakenteessa. Kuormittavan ajoneuvon nopeuden ollessa 5 km/h olivat huokosvedenpaineen arvot lähellä pintaa keskimäärin 30 % pienempiä ja syvämmällä rakenteessa jopa 70 % pienempiä kuin nopeudella 50 km/h.

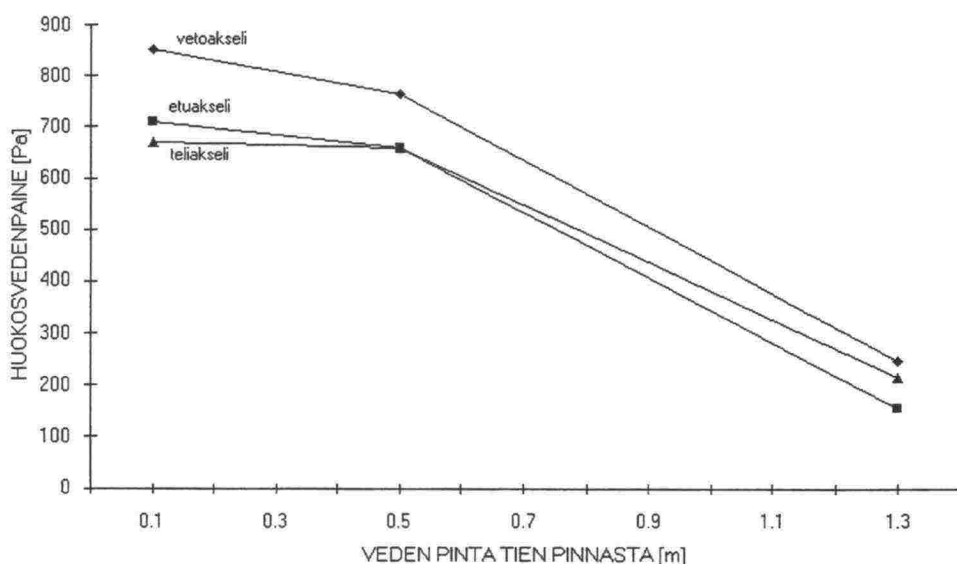
Tähän on osaksi syynä se, että vesi pääsee virtaamaan rakenteessa, jolloin osa kuormituksesta välittyy raerungolle, osa huokospaineeksi. Toisaalta suurella nopeudella dynaamisen akselipainon vaikutus on suurempi, mikä lisää myös huokospainetta. Nopeuden pienenemisen vaikutus päällysteen muodonmuutoksiin on päinvastainen, mutta syynä on päällysteen muodonmuutosmoduulin pieneneminen kuormitusajan kasvaessa.

Kuvassa 54 on esitetty edellisen taulukon mukaiset hiekkakerroksesta mitatut huokosvedenpaineet eri vedenkorkeuksilla. Huokosvedenpaine oli sitä suurempi, mitä enemmän vedellä kyllästettyä materiaalia oli tutkittavan kerroksen päällä. Eri akselien aiheuttamat huokospaineen lisät olivat lähes suoraan verrannolliset akselipainoon eli pyörätyypillä ei ole syvällä rakenteessa juurikaan merkitystä.

Kuvassa 55 on esitetty vastaavasti murskekerroksesta mitatut huokosvedenpaineet. Ylemissä kerroksissa on havaittavissa myös pyörätyypin vaikutus, etuakselin ja teliakselin vaikutus huokospainelisään on yhtä suuri, vaikka akselipainot ovat vastaavasti 60 ja 82 kN. Vetoakselin ja teliakselin vaikutukset ovat suhteessa akselipainoihin.



Kuva 54: Huokosvedenpaineet eri pohjaveden korkeuksilla hiekkakeroksessa 1,2 m tien pinnasta ohuella AB-rakenteella ("N"). Kuormituksena auto.



Kuva 55: Huokosvedenpaineet eri pohjaveden korkeuksilla murskekeroksessa 0,2 m tien pinnasta ohuella AB-rakenteella ("N"). Kuormituksena auto.

Liikennekuorman aiheuttaman huokospaineen lisän mittaminen on perusteltua, vaikka se olisi pienikin, koska se voi kuitenkin olla kriittinen. Huokospaineen raja-arvon ylittyminen aiheuttaa rakenteen löyhtymistä, kerrosten sekaantumista, paikallisia murtumia rakenteessa ja ennen pitkää painumia tien pintaan ja tien ennen aikaisen vaurioitumisen.



## 4 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

VTT:n tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio on kehittänyt vuodesta 1980 lähtien TIEL:n geokeskuksen toimeksiannosta tierasitusten mittauslaitteita. VTT/TGL on tehnyt sekä asfalttipäällysteen venymä-, taipuma ja pintapaineantureita että sitomattomien kerrosten paineantureita. Lisäksi kuorma-auton akseleille on asennettu venymäantureita ja auton eri osiin kiihtyvyyssantureita.

VTT/TGL on tehnyt Virttaan koekentällä vuosittain lukuisia mittausserioja, joissa on pyritty selvittämään erilaisten kuormitusten vaikutuksia tierakenteen rasitukseen vaihtelevissa ympäristöolosuhteissa.

Kaudella 1992 - 1993 oli pääasiallisena tutkimuskohteena roudan sulamisen simulointi ja tierasitusten mittaaminen sulamisen aikana. Lisäksi tutkittiin pohjaveden pinnan tason vaikutusta pyöräkuorman aiheuttamiin tierasituksiin korkeassa lämpötilassa ja tien reunavaikutusta pyöräkuorman aiheuttamiin päällysteen muodonmuutoksiin.

Mitatut suureet olivat päällysteen pinnan taipuma, sidotun kerroksen alapinnan venymä, sitomattomien kerrosten jännitys ja huokospaine. Mittauksissa saadut jännitykset ja muodonmuutokset muunnetaan ns. väsymissuorien avulla tierakenteelle sallituiksi kuormituskertaluvuiksi ja näitä vertaamalla päästään edelleen vastaavuuskertoimiin. Väsymissuorat perustuvat ns. neljännen potenssin sääntöön eli

$$\left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_b}\right)^4 = \frac{N_b}{N_a}$$

missä  $\varepsilon_a$  ja  $\varepsilon_b$  ovat akselipainoja  $P_a$  ja  $P_b$  vastaavat muodonmuutokset ja  $N_a$  ja  $N_b$  niitä vastaavat tierakenteen rikkoontumiseen tarvittavat kuormituskerrat.

Karkeasti ottaen muodonmuutokset ovat suoraan verrannollisia akselipainoihin. Tällöin akselipainon kasvaessa 20 % tien elinikä pienenee  $1/1,2^4$ :een eli vajaaseen puoleen.

Tutkittavana oli kolme eri rakennetta, joiden kuormituskestävyydet oli mitoitettu selvästi toisistaan poikkeaviksi. Vahvin rakenne oli suunniteltu kestäämään yli 8 miljoonaa kuormitusta ja heikoin vain 0,5 miljoonaa. Tierakenteen kuormitus/vaste-mittaustulokset osoittivat suunnilleen samanlaiset erot eri rakenteiden kuormituskestävyydelle. Seuraavassa tarkastellaan kunkin rakenteen sisäisiä eroja eri tekijöiden vaikutuksille, eikä rakenteita enää verrata keskenään.

Mittausten perusteella voidaan vetää seuraavia johtopäätöksiä:

1. Routaantumisen ja roudan sulamisen simulointi koerakenteessa onnistui hyvin.
2. Roudan sulamisen simulointi osoitti, että rakenteen ollessa routaantunut routakerroksen alapuolisilla vedenkorkeuden vaihteluilla ei ollut juurikaan merkitystä tierakenteen vasteeseen.
3. Kun routakerroksen yläpuolinen kerros tuli veden kyllästämäksi, rakenteen käyttäytyminen muuttui merkittävästi. Tienpinnan taipumat ja sitomattomien kerrosten jännitykset kasvoivat, mutta sidotun kerroksen alapinnan venymät pienenivät.
4. Rakennekerrosten in-situ materiaalimoduulit määritettiin pudotuspainolaitteen mittaustuloksista lineaarista monikerrosteorialla käytävällä takaisinlaskentaohjelmalla. Lasketut moduulit olivat likimain suunnitteluarvojen suuruisia.
5. Kosteuden ja jännitystason vaikutus materiaaliominaisuuksiin oli nähtävissä takaisinlaskentatuloksista. Murskeen ja hiekan moduuli pieneni kosteuden lisääntyessä ja kasvoi jännitystason kasvaessa.
6. Jäätäneen kerroksen vaikutus rakenteessa saatiin laskelmissa esiin. Jäätäneen kerroksen paksuuden ja kosteusolosuhteiden vaihtelut aiheuttivat tuloksiin hajontaa.
7. Sulan kauden (elokuu 1992) mittausten perusteella tehdyissä laskelmissa hajonta oli erittäin pientä.
8. Taipumasuppiloita tarkastelemalla voitiin myös päätellä eri rakenteiden käyttäytymisen eroja sekä kosteuden ja jännitystason vaihteluiden vaikutusta.
9. Korkeissa lämpötiloissa veden pinnan taso ei vaikuttanut dramaattisesti päällysteeseen aiheutuviin rasituksiin. Venymä lisäsi vain pohjaveden pinnan nostaminen tasolle 1,0 m tien pinnasta. Tienpinnan taipumia ja jännityksiä sitomattomissa kerroksissa lisäsi puolestaan vain pohjaveden pinnan nostaminen tasolta 1,0 m tasolle 0,1 m tien pinnasta.

10. Pudotuspainolaitteen tuloksista laskettuja venymiä verrattiin venymäantureilla mitattuihin venymiin. Kahdella eri menetelmällä (monikerrosteorialla ja Boussinesqin yhtälöillä) lasketut venymät vastasivat hyvin toisiaan. Mitattu venymä oli laskettua venymää suurempi. Venymämittauksissa kuormituksena oli liikkuva pyöräkuorma. Erot voivat johtua mm. auton erilaisista dynaamisista akselipainoista venymäanturin kohdalla sekä erilaisesta mittaus- ja laskentatekniikasta.
11. Pudotuspainolaitteella mitattuja taipumia ja monikerrosteorialla takaisinlaskettuja kerrosmoduuleja käyttäen laskettuja taipumia verrattiin taipumatangoilla mitattuihin pyöräkuorman aiheuttamiin taipumiin. Veden pinnan korkeuden muutoksen vaikutus eri tavoilla määritettyihin taipumiin oli samansuuntainen. Tasoero johtui siitä, että taipumatanko mittaa taipumaa 1,5 m syvyyteen, kun kuormitusvaikutus eri rakenteilla ulottuu syvemmälle.
12. Reunan vaikutus päällysteen alapintaan aiheutuviin venymiin oli päinvastainen, mitä oli oletettu. Kyseisellä rakenteella ehkä näin tuli ollakin, koska koerakenne liittyi sivusuunnassa suoraan jäykkään maabetonirakenteeseen, ja sivuoja oli 10 m päässä. Tämä osa tutkimusta tulisi tehdä muualla kuin Virtaalla.

Jatkossa ehdotetaan tutkittavaksi seuraavia asioita:

1. Jäätynen kerroksen paksuuden mittausta tulee tarkentaa. Tämä voidaan tehdä asentamalla lisää routamittareita, koska sulaminen oletettavasti tapahtuu eri tavalla erilaisissa rakenteissa. Maatutkaa käyttämällä tarvittavien routamittareiden määrää voidaan vähentää. Maatutkalla voidaan mitata rakenteen poikkiprofiili esim. kahden metrin välein sekä kolme pituusprofiilia. Maatutkamittausten tulokset voidaan muuttaa absoluuttisiksi kerrospaksuuksiksi routamittarien lukeman avulla. Näin jäätynen kerroksen paksuus voidaan määrittää tarkemmin laskelmia varten.
2. Myöhemmin tulee tehdä samanaikaisia mittauksia pudotuspainolaitteella ja mittausantureilla mitattujen ja pudotuspainolaitteen tuloksista laskettujen muodonmuutosten ja siirtymien välisen yhteyden selvittämiseksi. Tässä tulee ottaa suunnitellusti huomioon eri rakennetekijöiden (kerrospaksuudet ja



materiaalit) vaihtelun vaikutus tuloksiin tilastollisen koesuunnittelun avulla. Rakenteiden instrumentointi on kuitenkin suhteellisen kallista eikä kaikkia erilaisia rakenteita voida instrumentoida. Huolellisen koesuunnittelun merkitys korostuu, jotta tulokset olisivat yleistettävissä.

3. Saaduissa mittaus- ja laskentatuloksissa on jonkin verran selittämättömiä ristiriitaisuuksia, joten mittauksen jatkaminen ja useampien laskentaohjelmien testaaminen tulosten täydentämiseksi ja varmentamiseksi olisi tarpeellista.
4. Reunavaikutuksen tutkiminen on syytä uusilla normaalilla tierakenteella, missä on luiska, jolloin reunatuki tien sivussa on pienempi kuin tiessä keskemmällä. Tähän tulee etsiä sopiva paikka esimerkiksi normaalin tien tai levähdysalueen ramppi-alueilta.

## 5 KIRJALLISUUSLUETTELO

- 1 Huhtala, M., Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa Otaniemen koekuopassa. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 384. Espoo 1984. 56 s. Julkaisematon.
- 2 Alkio, R., Huhtala, M., Kokkonen, M., Pihlajamäki, J., Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa, koekuopan rakentaminen ja testaaminen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 413. Espoo 1984. 48 s.
- 3 Huhtala, M., Pihlajamäki, J., Kuorma-autoakselistojen vaikutus tierakenteiden rasittumiseen vuoden 1983 mittauksiin perustuen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 438. Espoo 1984. 47 s.
- 4 Huhtala, M., Pihlajamäki, J., Kuorma-autoakselistojen vaikutus tierakenteiden rasittumiseen vuoden 1984 mittauksiin perustuen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 506. Espoo 1986. 55 s. + liitt. 20 s.
- 5 Strain measurements in bituminous layers. OECD Road transport research, group I 2. Berne 1985. 163 s.
- 6 Huhtala, M., Tierakenteita koskevat kansainväliset vertailevat jännitysmittaukset Italiassa. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 454. Espoo 1984. 31 s.
- 7 Huhtala, M., Pihlajamäki, J., Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1985. Koekentän rakentaminen, päällysteen paksuuden, lämpötilan ja epätasaisuuden vaikutuksen tutkiminen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 569. Espoo 1987. 48 s.
- 8 Huhtala, M., Pihlajamäki, J., Jännitys- ja muodonmuutos mittaukset tierakenteessa 1986. Päällysteen lämpötila, paksuus, rengaspaine ja uudet anturit. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 634. Espoo 1987. 38 s.
- 9 Huhtala, M., Pihlajamäki, J., Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1987 - 1988. Mittauskentän rakentaminen, pitkittäinen/poikittainen muodonmuutos, jännitysjakautuma kantavassa

- kerroksessa, dynaamiset akselipainot. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 683. Espoo 1989. 43 s.
- 10 Huhtala, M., Pihlajamäki, J., Optimalt däckval för tunga fordon. Fältmätningar. Statens tekniska forskningscentral, väg- och trafiklaboratoriet. Espoo 1989. 75 s.
  - 11 Huhtala, M., Pihlajamäki, J., Jännitys- ja muodonmuutos mittaukset tierakenteessa 1988 - 1989. Dynaaminen pintapainemittaus, dynaamiset akselipainot ja epätasaisuuden vaikutus, poikittainen muodonmuutos. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 752. Espoo 1990. 38 s.
  - 12 Huhtala, M., Pihlajamäki, J., Jännitys- ja muodonmuutos mittaukset tierakenteessa 1989 - 1990. Tienpinnan tai-pumamittaus, muodonmuutos päällysteessä eri suunnissa. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 816. Espoo 1990. 32 s.
  - 13 OECD Full Scale Pavement Test - 1990. Proceedings of the concluding conference - force project. 15-17 May 1991 La Baule, France. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Paris 1992: 420 s.
  - 14 Pihlajamäki, J., Satelliittikoe Neste Oy:n kantavuusradalla. OECD:n vertailukoe. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio, tutkimusraportti 86. Espoo 1992. 50 s. + liitt. 22 s.
  - 15 Claessen, A.I.M., Edwards, J.M., Sommer, P. and Uge, P., Asphalt pavement design - the Shell method. Ann Arbor, Michican 1977. Proceedings of the Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michican, Volume I, s. 39 - 74.
  - 16 Heavy trucks, climate and pavement damage. OECD Road transport research, group I 5. Paris 1988. 176 s.
  - 17 Huhtala, M., Erilaisten kuorma-autojen vaikutus tierakenteeseen. Tie- ja liikenne 10/1985, s. 425 - 429.
  - 18 Huhtala, M., The effect of different heavy freight vehicles on pavements. The tenth International Road Federation World Meeting, Rio de Janeiro, October 1984. Vol. I. Road Usage and Traffic Safety, s. 169-177.



- 
- 19 Huhtala, M., Erialaisten kuorma-autojen vaikutus tierakenteeseen. Tie- ja liikenne luentopäivät 1985, Helsinki. s. 252-261.
  - 20 Huhtala, M., The Effect of Different Trucks on Road Pavements. Proceedings. International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. June 8-13, 1986, Kelowna, British Columbia, Canada. 1988. s. 151-159.
  - 21 Huhtala, M., Field Tests to Compare Tires. Load Equivalency Workshop, FHWA Turner-Fairbank Research Center, September 13-15, 1988. 12 s.
  - 22 Huhtala, M., Optimalt däckval för tunga fordon. Tunga lastbilar nu och i framtiden. TFK-konferens 2-3 maj 1988. TFK rapport 1988:8. s. 138-147.
  - 23 Huhtala, M., Pienimäki, M., Pihlajamäki, J., Kuorma-autojen vaikutus tiehen. Tie- ja liikenne luentopäivät 1988, Tampere. s. A13-A21.
  - 24 Load Equivalency Workshop Synthesis. Federal Highway Administration. Report No. FWHA-RD-89-117. 1989. 169 s.
  - 25 Huhtala, M., Pienimäki, M., Pihlajamäki, J., Effects of Tires and Tire Pressures on Road Pavements. Transportation Research Record 1227. Transportation Research Board. Washington D.C. 1989. s. 107-114.
  - 26 Huhtala, M., Pienimäki, M., Pihlajamäki, J., Interaction Between Heavy Freight Vehicles and Pavements. 11th International Road Federation World Meeting, April 1989, Seoul, Korea. Proceedings, Vol. IV, s. 136-139.
  - 27 Huhtala, M., Alkio, R., Pienimäki, M., Pihlajamäki, J., Halonen, P., Measurement of strains in bituminous pavements subjected to heavy loads. Preprint 890160. TRB Annual Meeting 1990. Washington D.C. 43 s.
  - 28 Huhtala, M., Alkio, R., Pienimäki, M., Pihlajamäki, J., Halonen, P., Behavior of Bituminous Materials Under Moving Axle Loads. Preprint. Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists, February 1990, Albuquerque, New Mexico. 36 s.

- 29 Huhtala, M., Pihlajamäki, J., Truck Tires and Pavements. Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields. July, 3-5, 1990, Trondheim. Proceedings, Vol. II, s. 669-679.
- 30 Pihlajamäki, J., Huhtala, M., Alkio, R., Täysimittaiset tiekokeet. Tie- ja liikenne luentopäivät 1988, Turku. s. C7-C12.
- 31 Huhtala, M., Strain and stress measurements in pavements. Nordic Road and Transport Research No 2. 1990. s. 9-12.
- 32 Huhtala, M., The Finnish Strain Measurements. Concluding Conference on the International Full-Scale Pavement Test at the LCPC Test Track in Nantes (France). 15-17 May 1991 La Baule. 13 s.
- 33 Pihlajamäki, J., The Finnish Cross Tests. Concluding Conference on the International Full-Scale Pavement Test at the LCPC Test Track in Nantes (France). 15-17 May 1991 La Baule. 9 s.
- 34 Full Scale Pavement Tests. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Road Transport Research. Scientific Expert Group I2. Paris 1985. 101 s.
- 35 Strain Measurements in Bituminous Layers. OECD Road Transport Research. Scientific Expert Group I2. Berne 1985. 163 s.
- 36 OECD Full Scale Pavement Test. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Road Transport Research. Scientific Expert Group I4. Paris 1991. 266 s.
- 37 Huhtala, M. & Pihlajamäki, J., Strain and stress measurements in Pavements. Second International Symposium: State of the Art of Pavement Monitoring Systems for Roads and Airfields 10-13 September 1991, CRREL, N.H., USA. 19 s.
- 38 Pienimäki, M., Huhtala, M., Tierakenteessa mitattujen ja teoreettisesti laskettujen rasitusten vertailu. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 570. Espoo 1986. 35 s.
- 39 Pienimäki, M., Huhtala, M., Tierakenteen mitoitusmenetelmiin sisältyvien väsymissuorien määrittäminen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 571. Espoo 1986. 32 s.+liitt. 6 s.

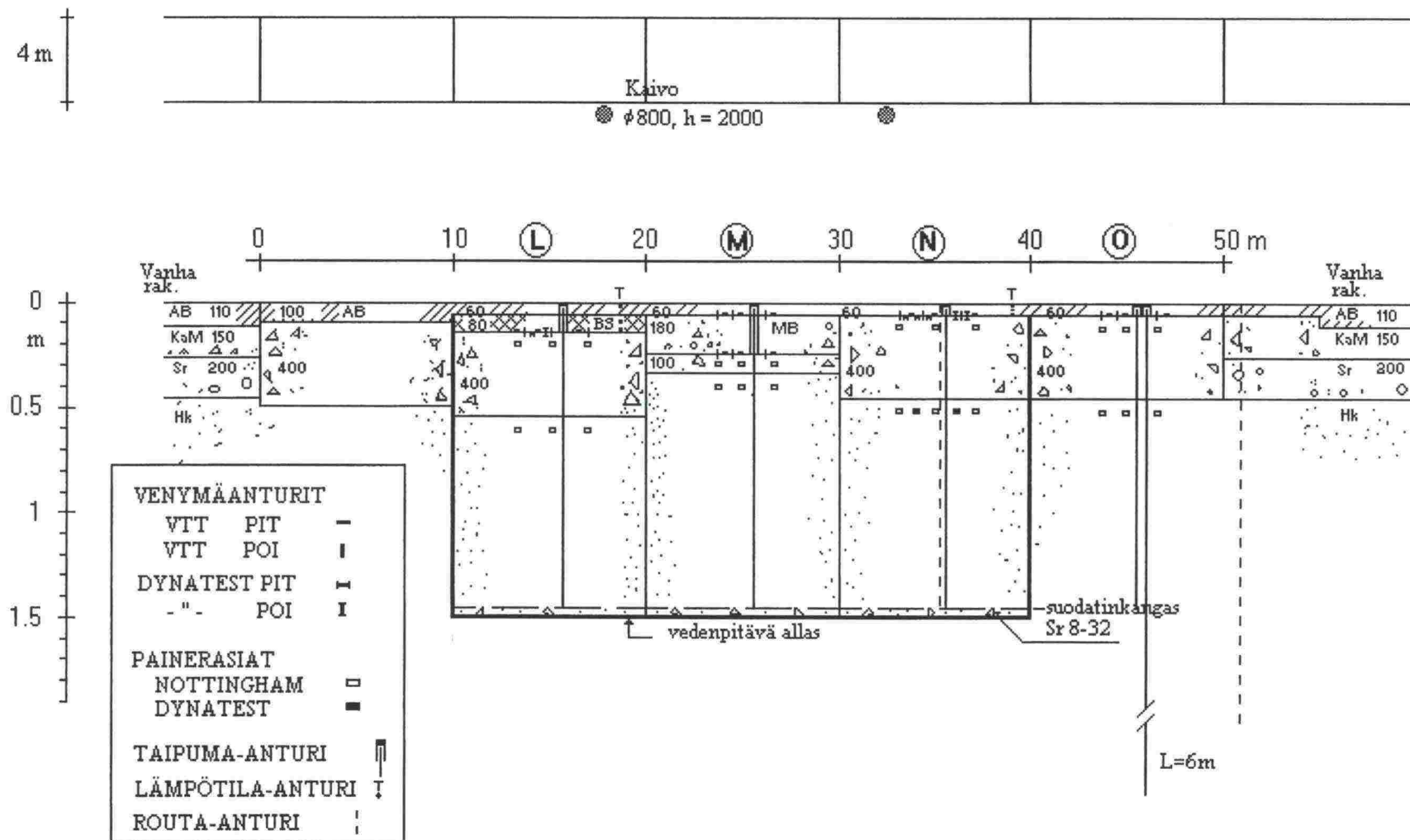
- 
- 40 Pienimäki, M., Huhtala, M., Pihlajamäki, J., Kuorma-autoakselistojen vertailu. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 572. Espoo 1986. 41 s. + liitt. 10 s.
- 41 Pienimäki, M., Huhtala, M., Tierakenteen kantavuuden herkkyyshanalyysi. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 692. Espoo 1988. 28 s.
- 42 Jämsä, H., Huhtala, M., Pihlajamäki, J., Tierakenteen teoreettiset laskelmat, Odemarkin menetelmän tarkastelu. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 756. Espoo 1988. 23 s. + liitt. 6 s.
- 43 Simonsen, P. och Hjalmarsson, S-O., Grundvattenytans inverkan på bärigheten. Ett fullskaleförsök. Statens väg- och trafikinstitut. VTI Rapport 131. Linköping 1977. 24 s.
- 44 Pihlajamäki, J., Jännitys- ja muodonmuutos mittaukset tierakenteessa 1991 - 1992. Pohjaveden pinnan vaikutus, tienpinnan taipumamittaus eri lämpötiloissa, vertailu standardi paripyörä-Neste Oy:n kantavuusradan pyörä. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio, tutkimusraportti 94. Espoo 1992. 43 s. + liitt. 9 s.
- 45 Brown, S., State-of the Art Report on Field Instrumentation for Pavement Experiments. Transportation Research Board. Transportation Research Record 640. 1977. pp 13-28.
- 46 Lampinen, A., Variation av bärigheten i vägens tvärprofil. Statens tekniska forskningscentral, Väg- och trafik-laboratoriet, Forskningsrapporter 222. Esbo, september 1983. 49 s.
- 47 Huhtala, M., Kurki, T., Orama, R., Pihlajamäki, J., Ruotoistenmäki, A., Väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten. Tielaitos, Tielaitoksen selvityksiä 47. Helsinki 1993. 48 s. + liitt.
- 48 Odemark, N., Undersökning av elasticitetsegenskaperna hos olika jordarter samt teori för beräkning av beläggningar enligt elasticitetsteorin. Statens väginstitut, Meddelande 77. Stockholm 1949.
- 49 Pas1, Pavement Analysis Software, user's manual. Geroute Dynatest France. Antibes 1988.



- 50 Jämsä, H., Spoof, H., Ruotoistenmäki, A., Strategic Highway Research Program (SHRP), Long Term Pavement Performance (LTPP). Materiaalimoduulien määrittäminen takaisinlaskentaohjelmilla sekä tierakenteen vaurioitumisajankohdan ennustemallit. Tielaitos, Geokeskus. Tielaitoksen selvityksiä 3/1994. Helsinki, 1994. 63 s. + liitt.
  
- 51 Lenngren Carl A., Relating Bearing Capacity to Pavement Condition. bulletin 1990:1, Institutionen for vägteknik KTH, Stockholm.

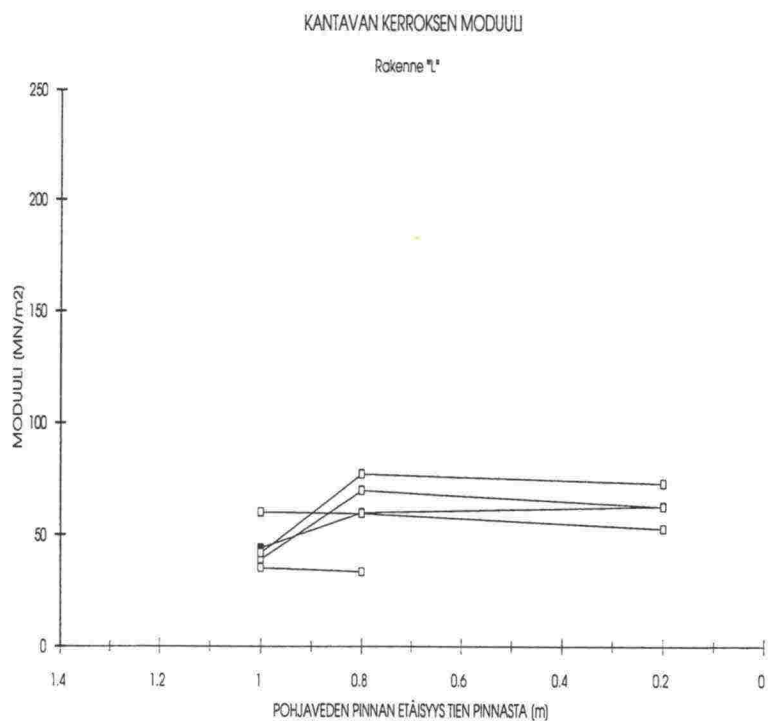
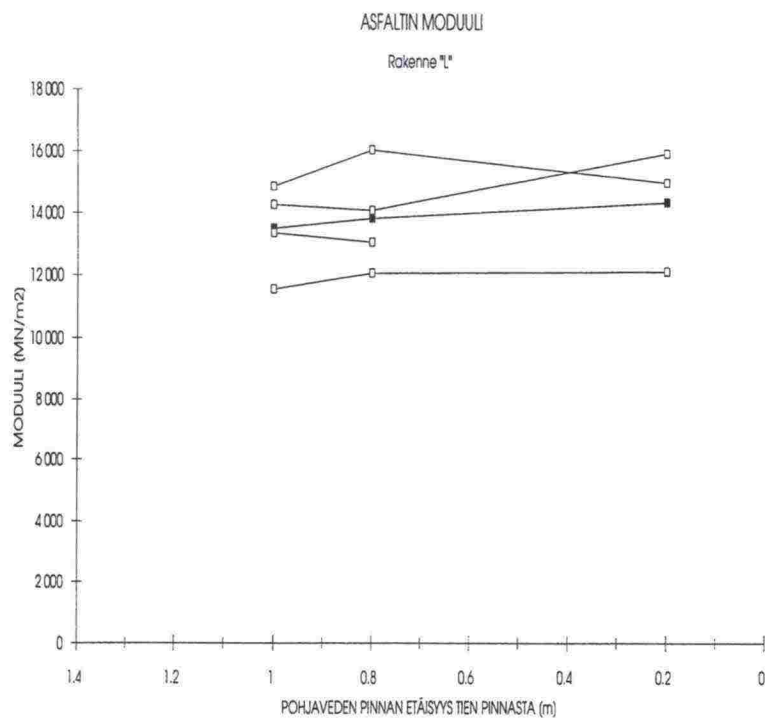
## 6 LIITTEET

- Liite 1. Virttaan koekentän rakenteet.
- Liite 2. Virttaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennererrosmoduulien vaihtelu maaliskuun mittauksissa.
- Liite 3. Virttaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu huhtikuun mittauksissa.
- Liite 4. Virttaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu elokuun mittauksissa.
- Liite 5. Virttaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu maaliskuun mittauksissa.
- Liite 6. Virttaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu huhtikuun mittauksissa.
- Liite 7. Virttaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu elokuun mittauksissa.



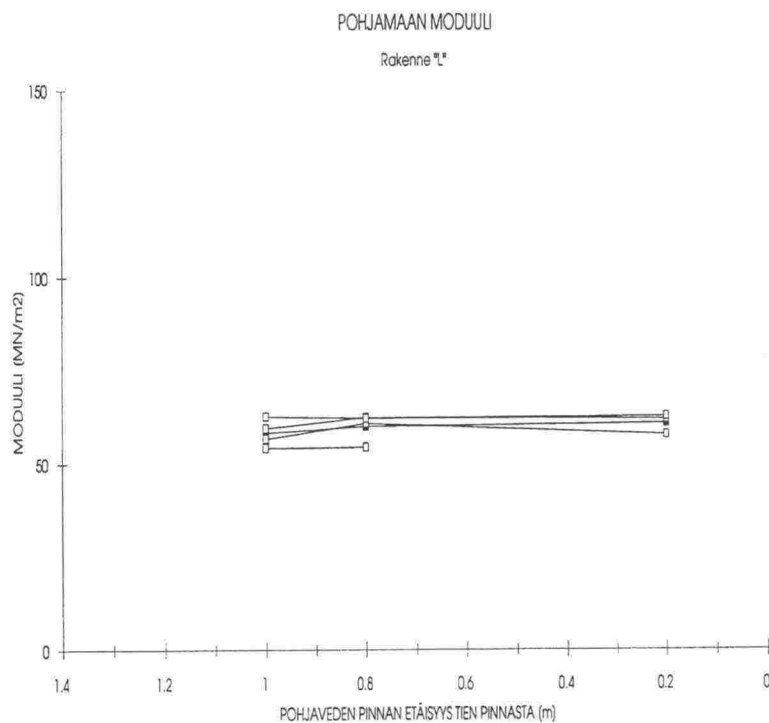
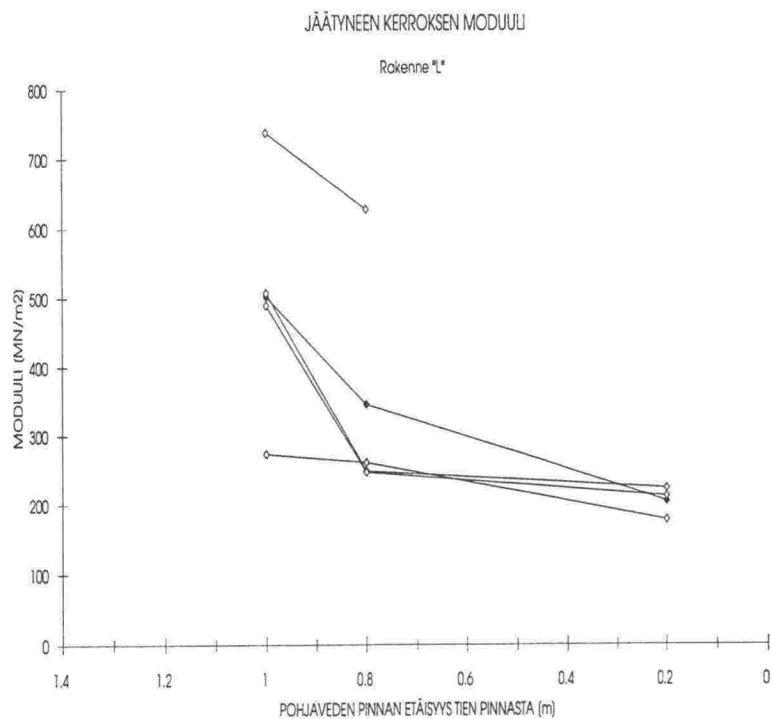
Koekentän rakenteet.



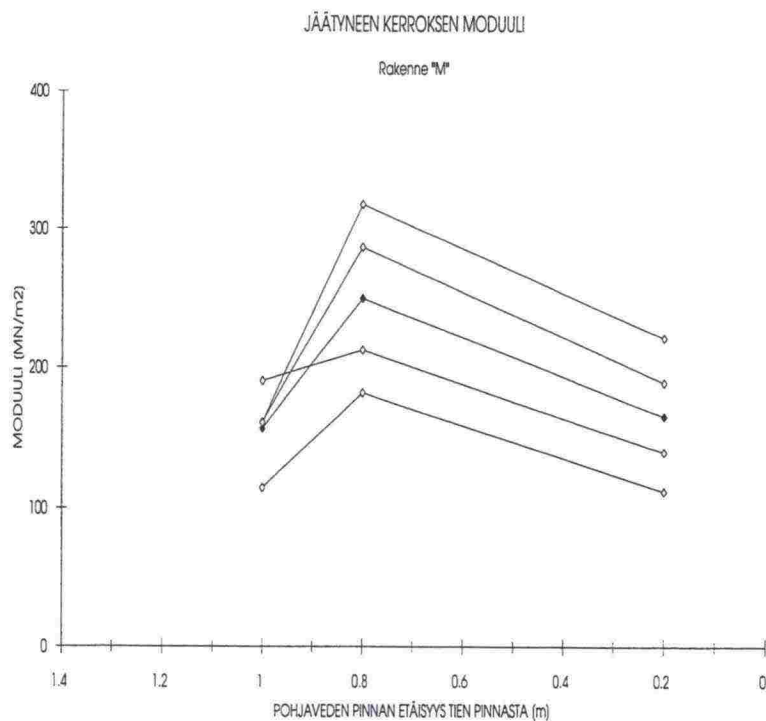
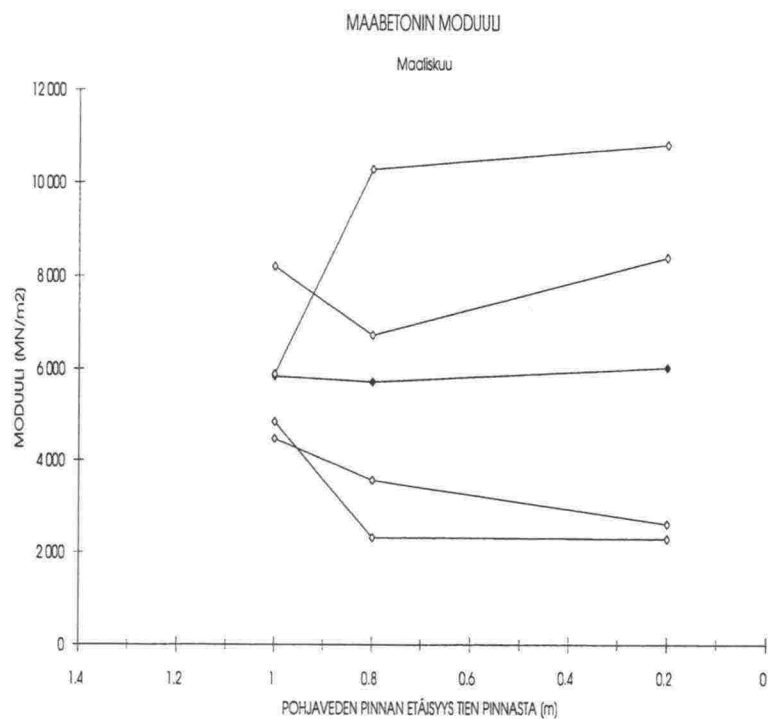


Liite 2. Virtaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu maaliskuun mittauksissa.

## LIITE 2/2

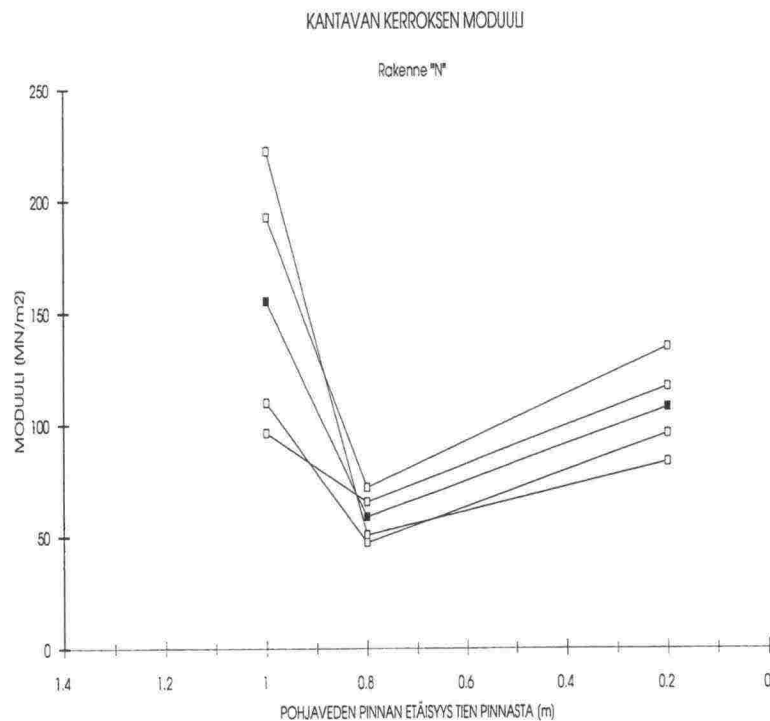
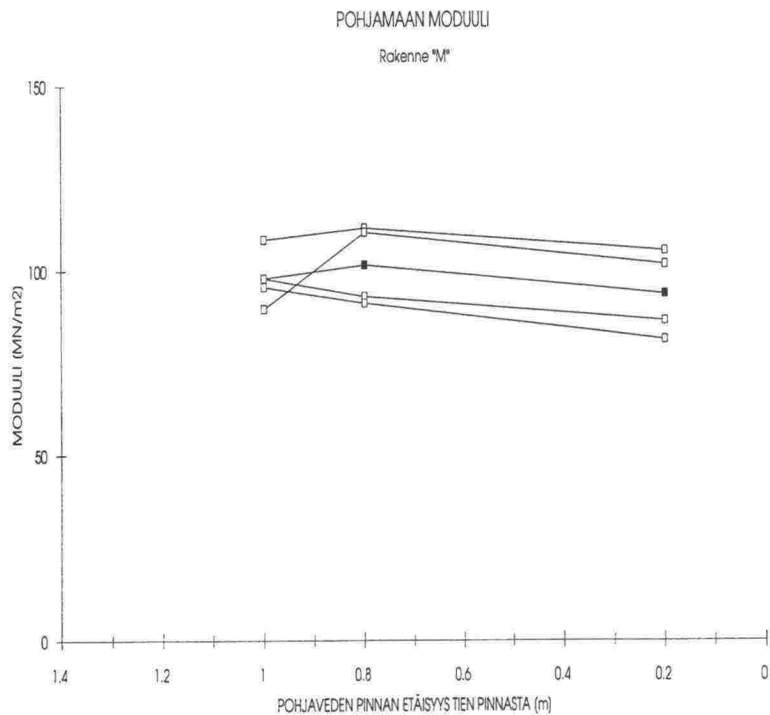


Liite 2. Virtaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu maaliskuun mittauksissa.

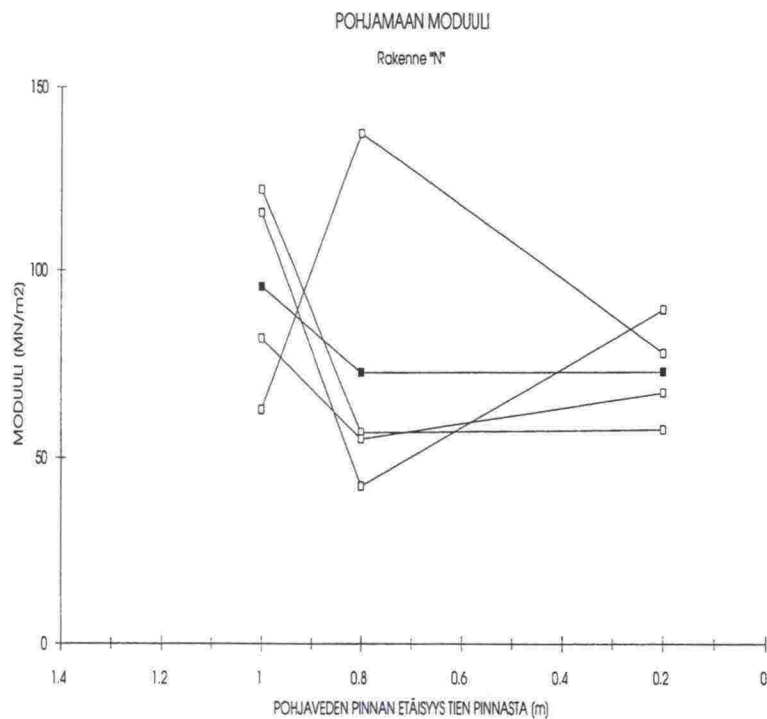
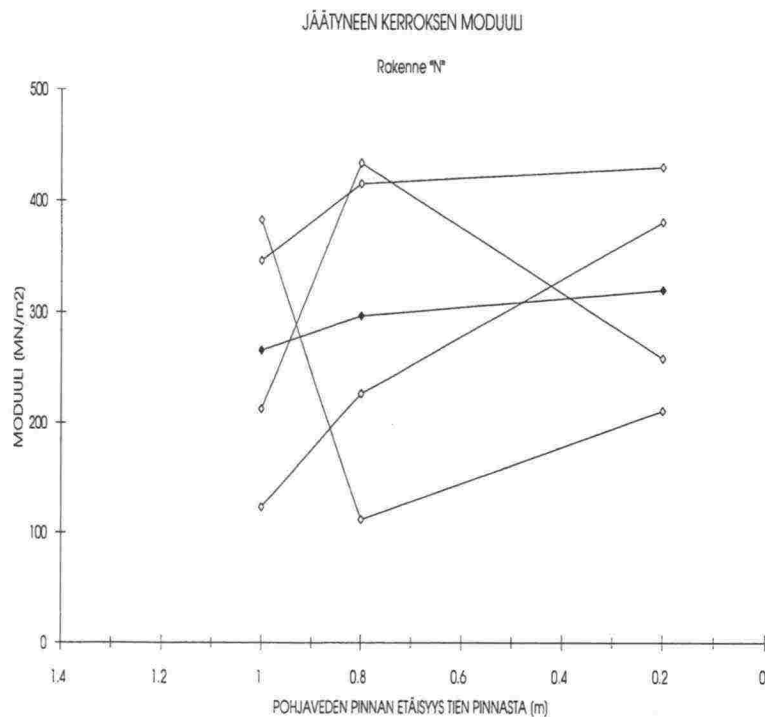


Liite 2. Virtaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu maaliskuun mittauksissa.

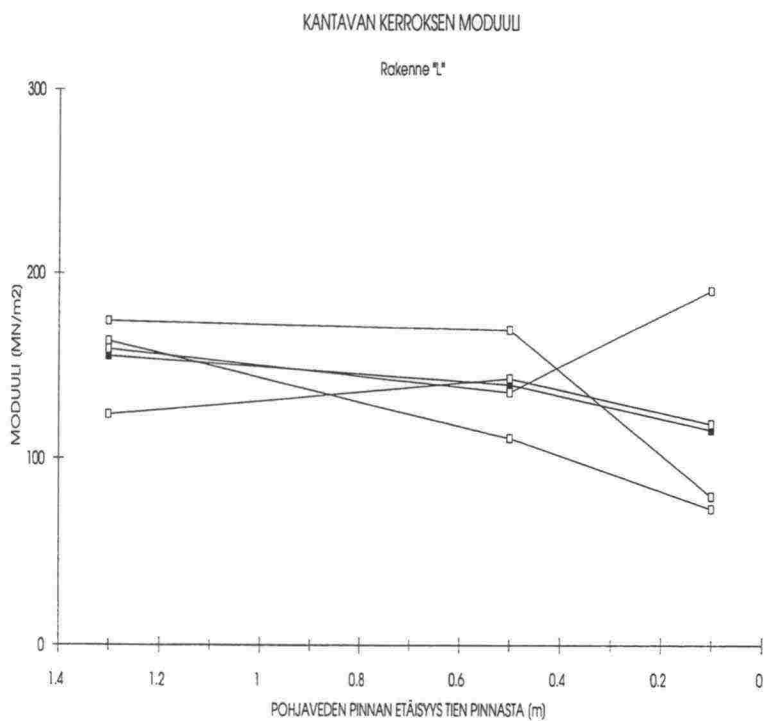
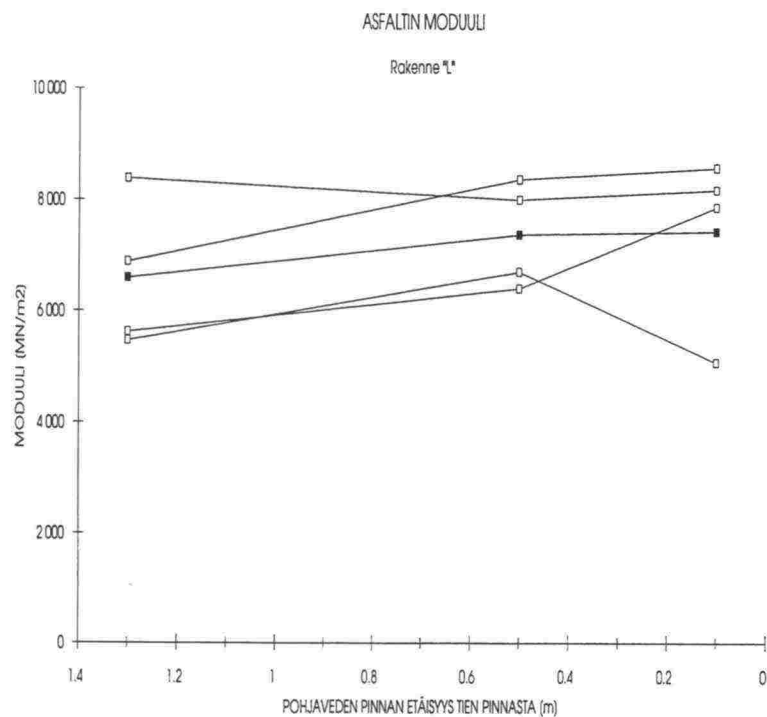




Liite 2. Virtaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu maaliskuun mittauksissa.

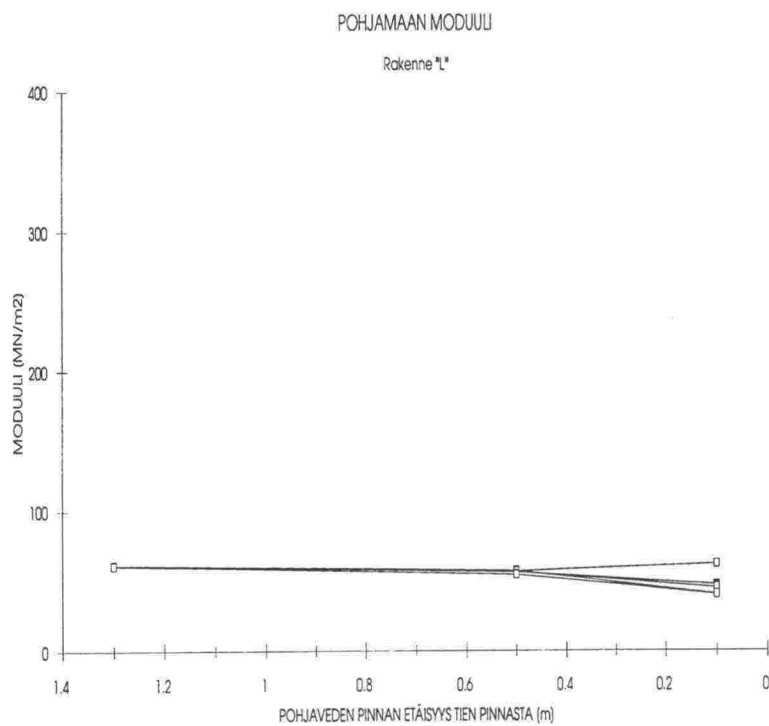
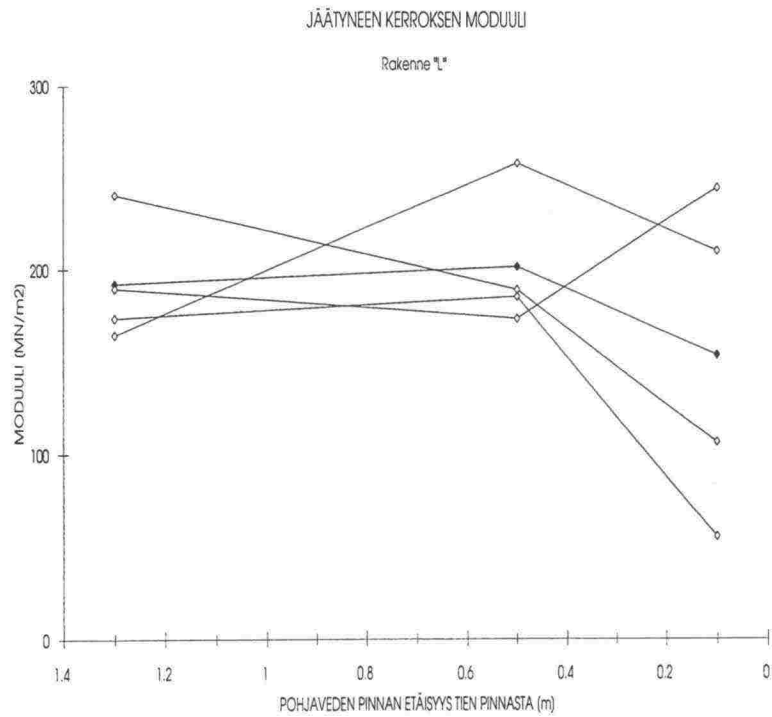


Liite 2. Virtaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu maaliskuun mittauksissa.



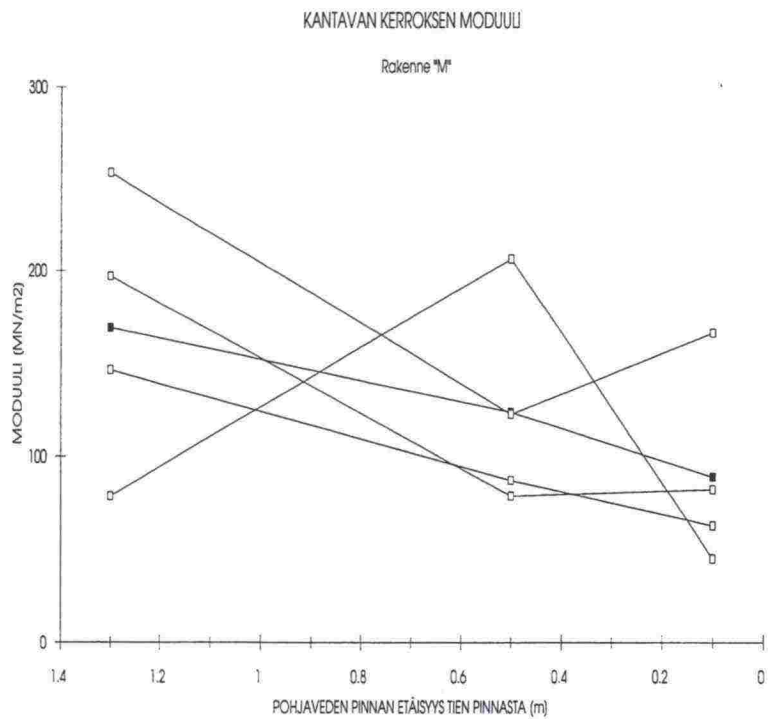
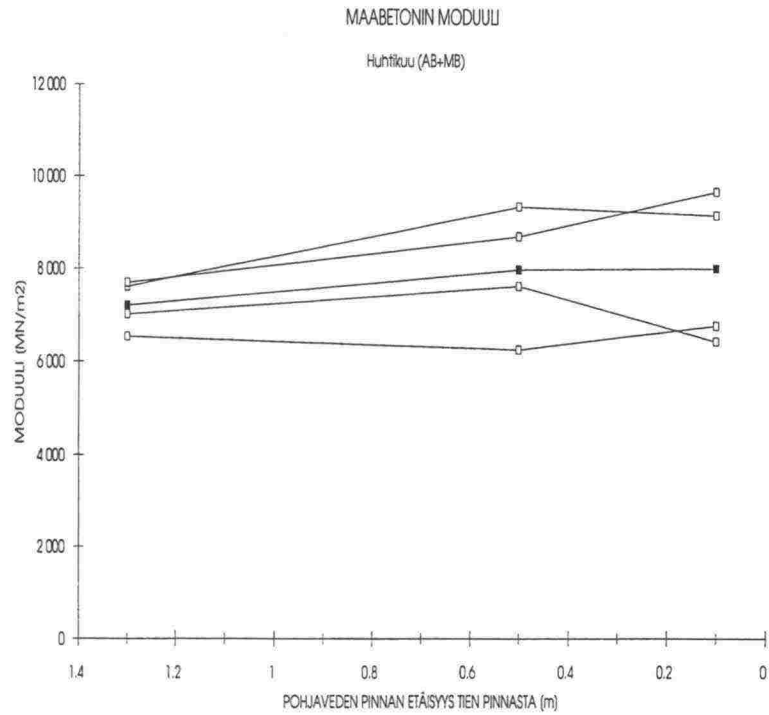
Liite 3. Virtaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu huhtikuun mittauksissa.

# LIITE 3/2

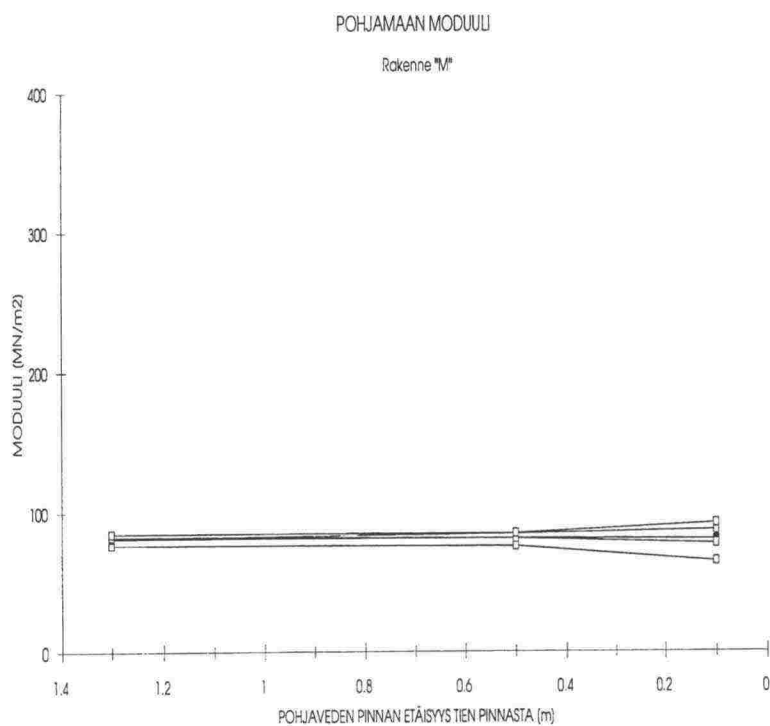
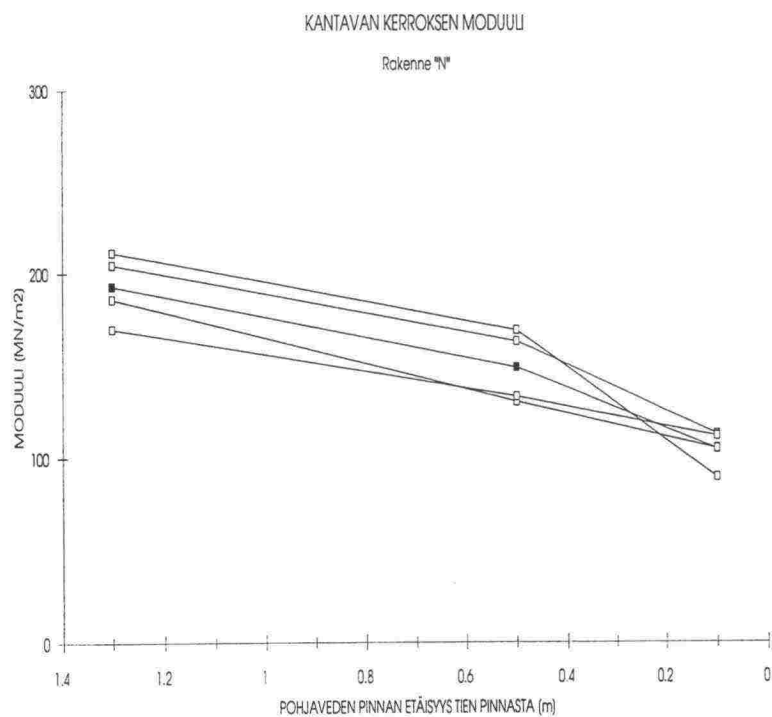


Liite 3. Virtaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu huhtikuun mittauksissa.

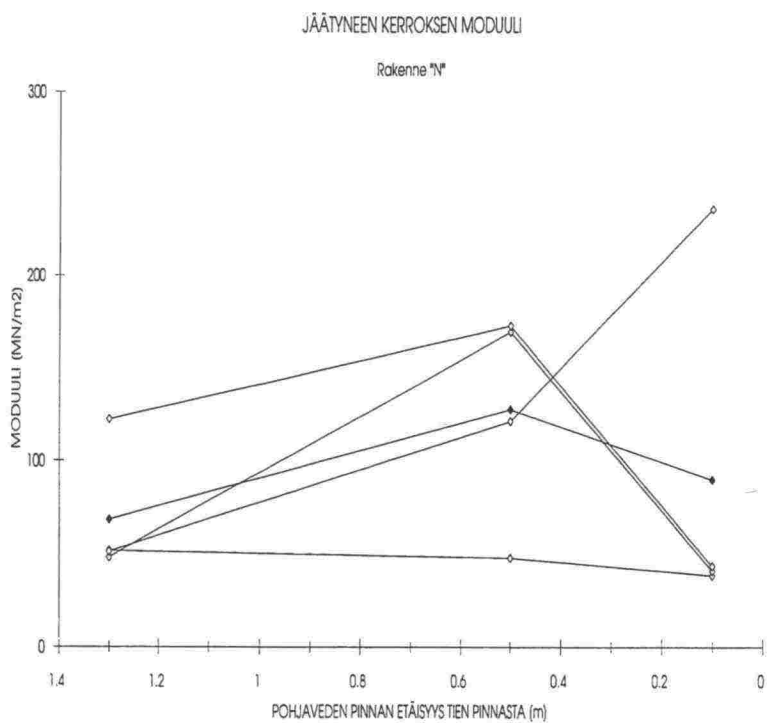
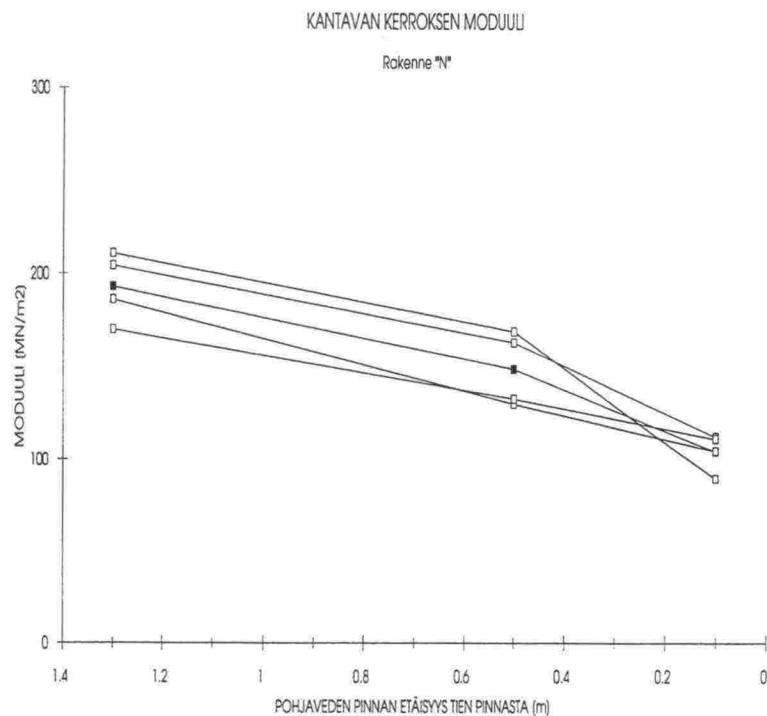




Liite 3. Virttaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu huhtikuun mittauksissa.

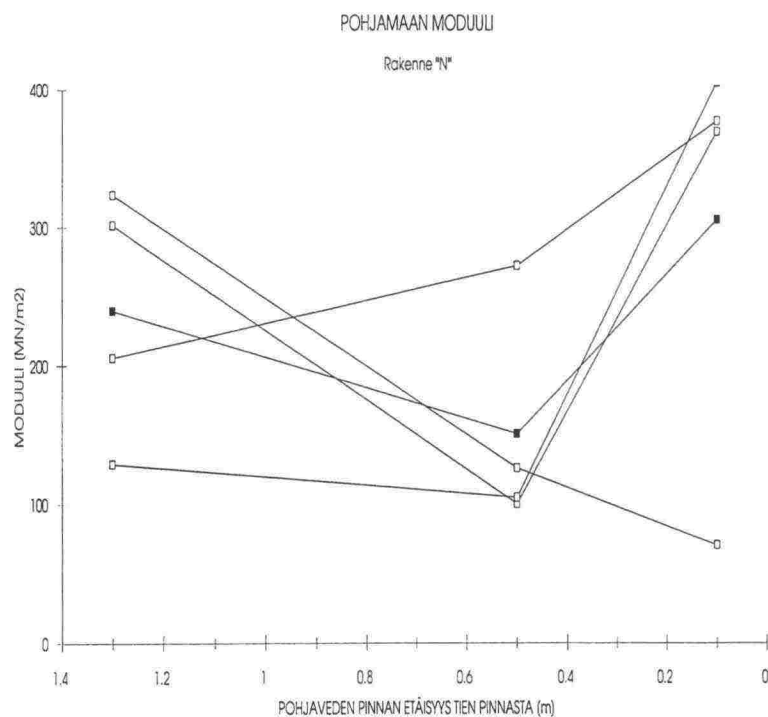


Liite 3. Virtaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu huhtikuun mittauksissa.



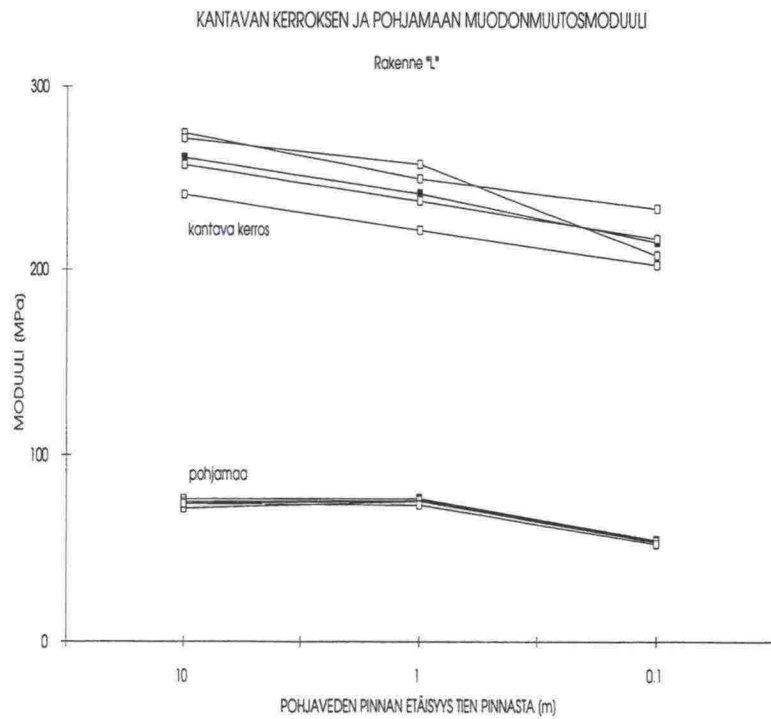
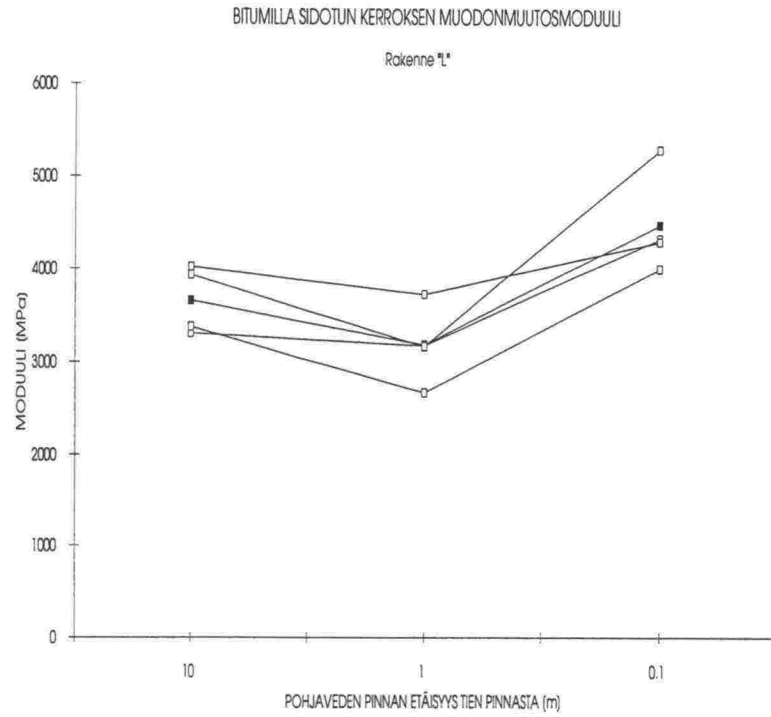
Liite 3. Virtaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu huhtikuun mittauksissa.

# LIITE 3/6



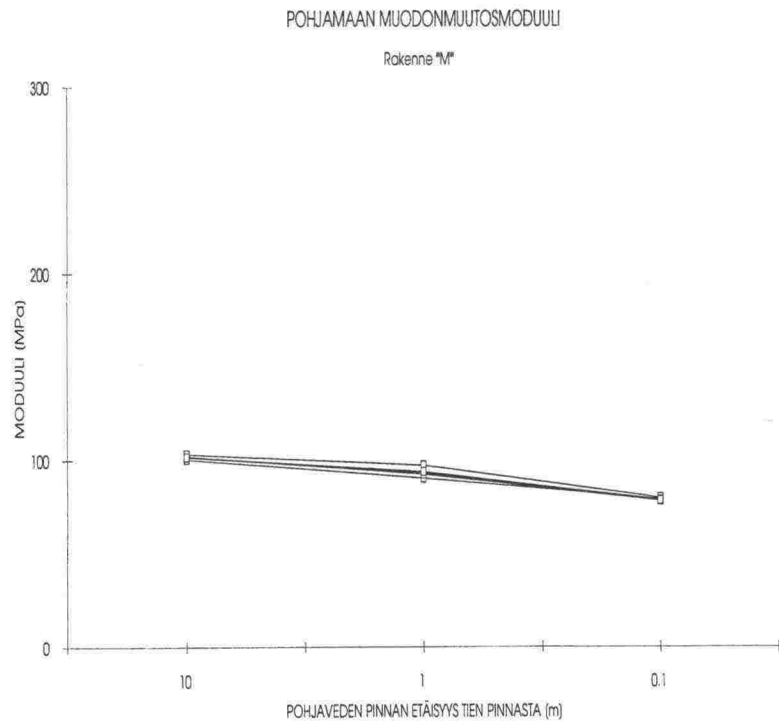
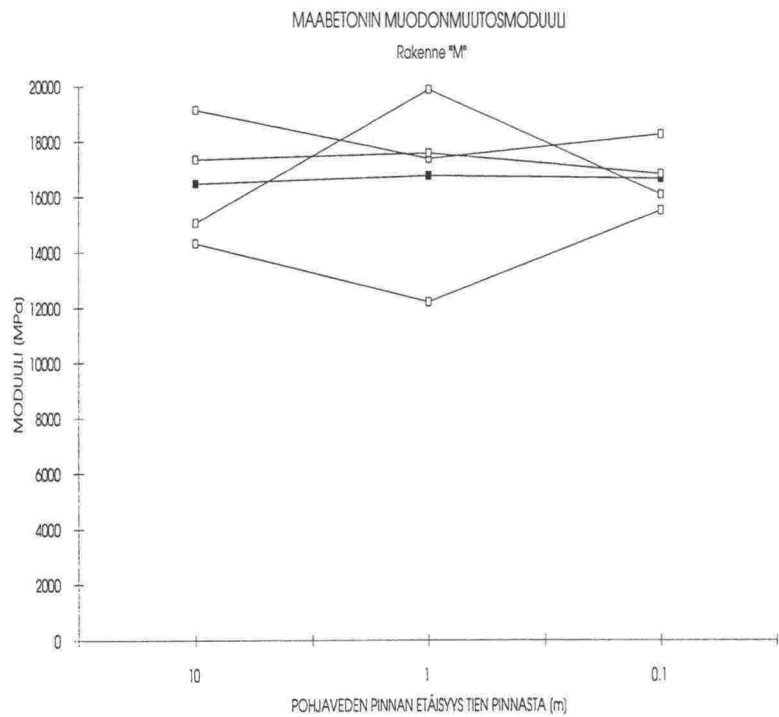
Liite 3. Virtaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu huhtikuun mittauksissa.



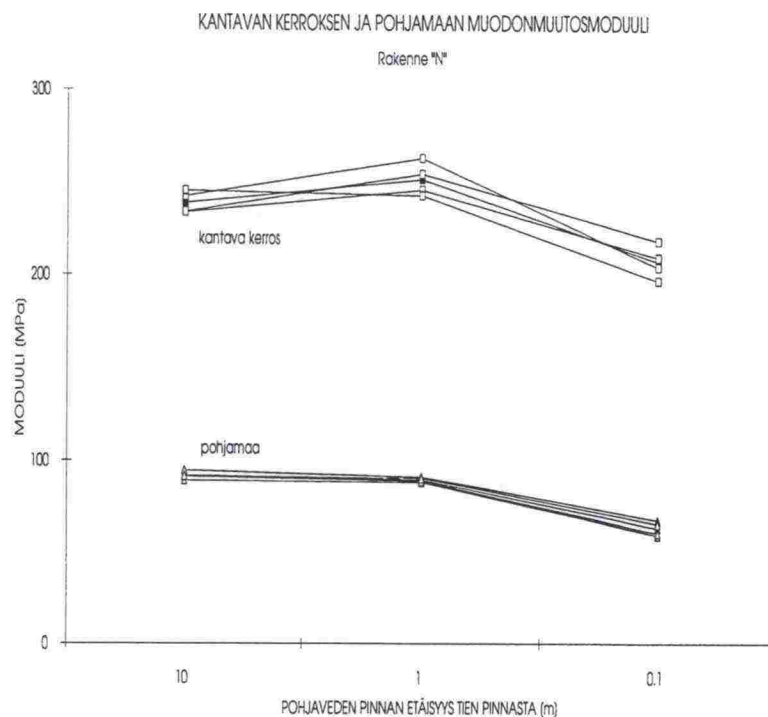


Liite 4. Virtaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu elokuun mittauksissa.

LIITE 4/2

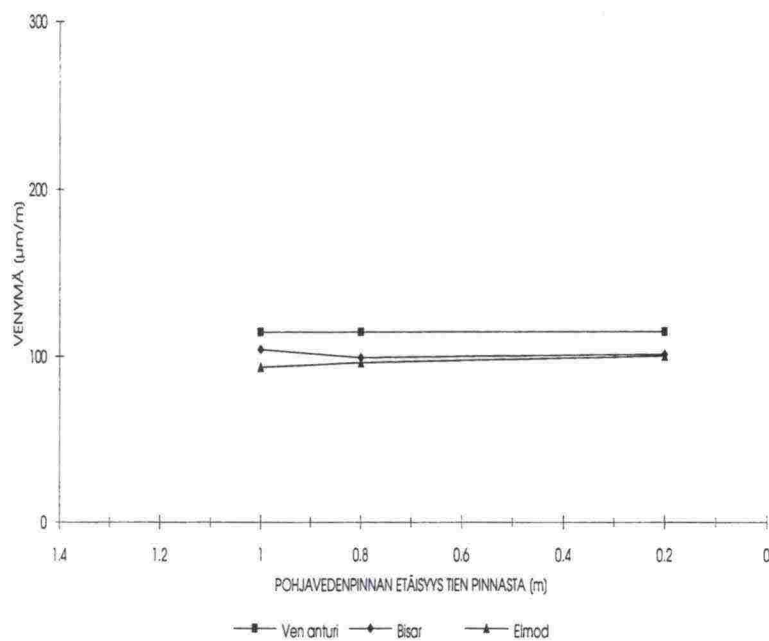


Liite 4. Virtaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu elokuun mittauksissa.

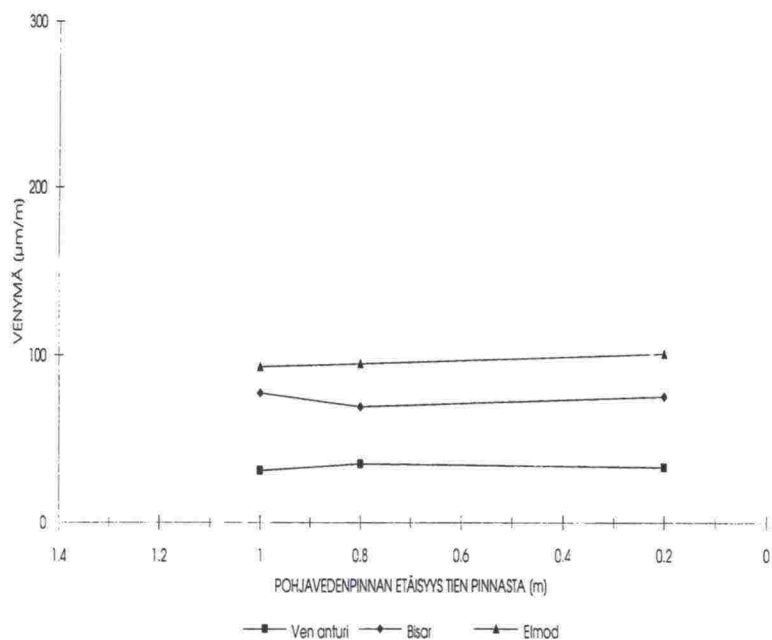


Liite 4. Virtaan koekenttä. Pudotuspainolaitteella määritettyjen rakennekerrosmoduulien vaihtelu elokuun mittauksissa.

SIDOTUN KERROKSEN ALAPINNAN VENYMÄT, RAKENNE L



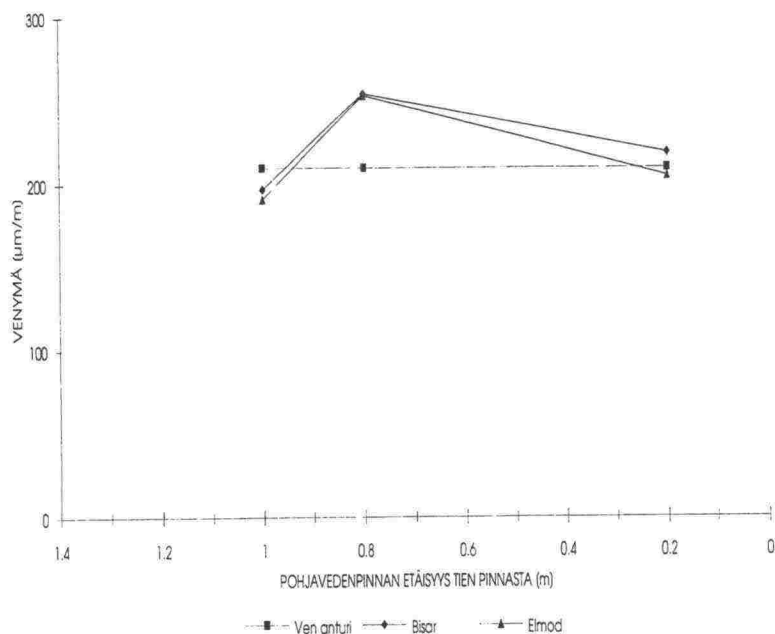
SIDOTUN KERROKSEN ALAPINNAN VENYMÄT, RAKENNE M



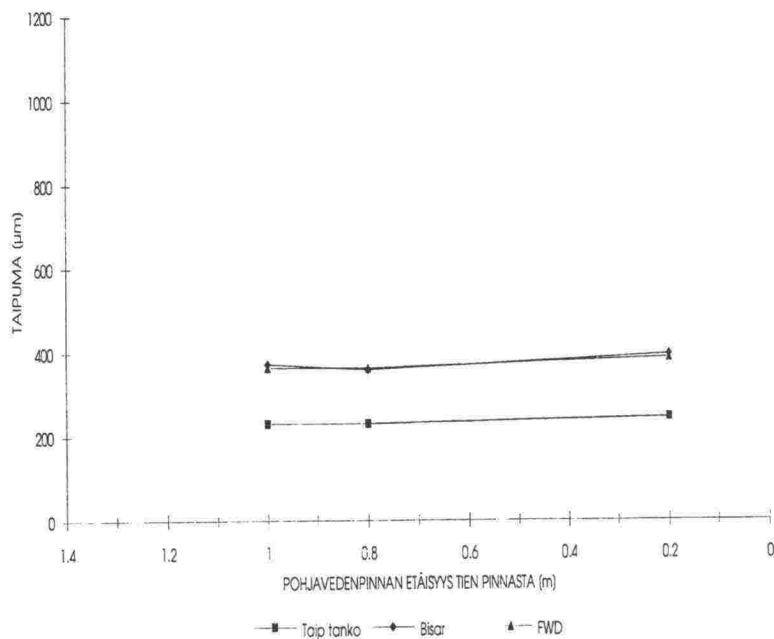
Liite 5. Virtaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu maaliskuun mittauksissa.



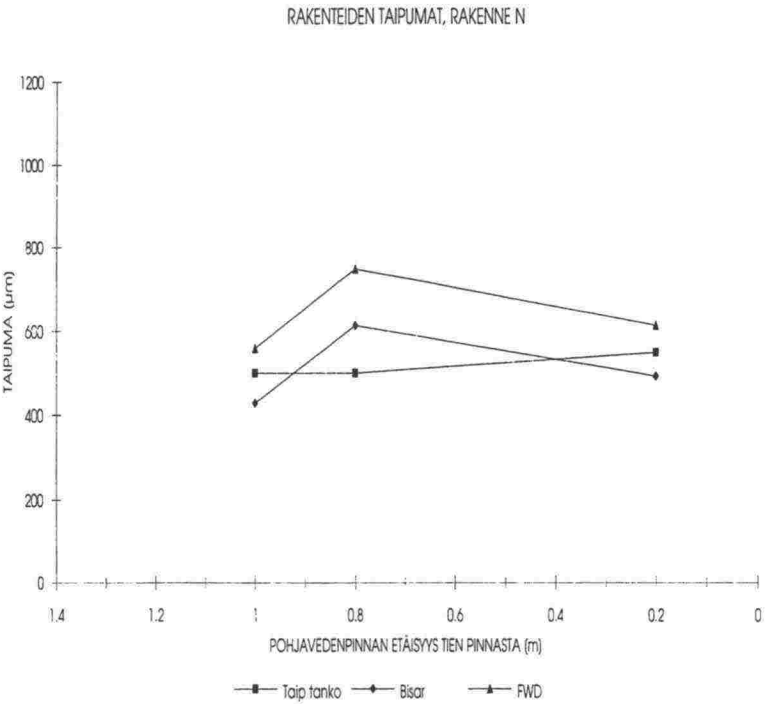
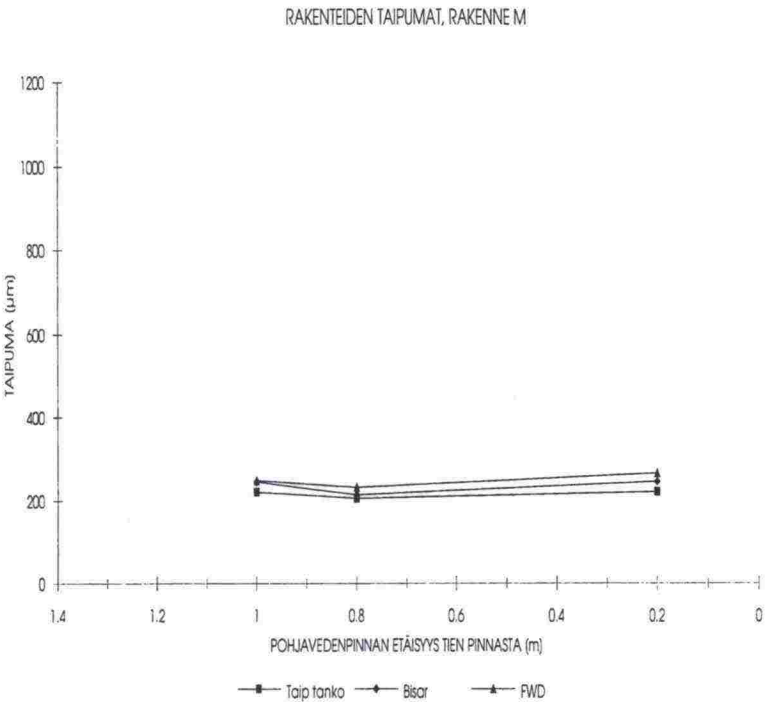
SIDOTUN KERROKSEN ALAPINNAN VENYMÄT, RAKENNE N



RAKENTEIDEN TAIPUMAT, RAKENNE L

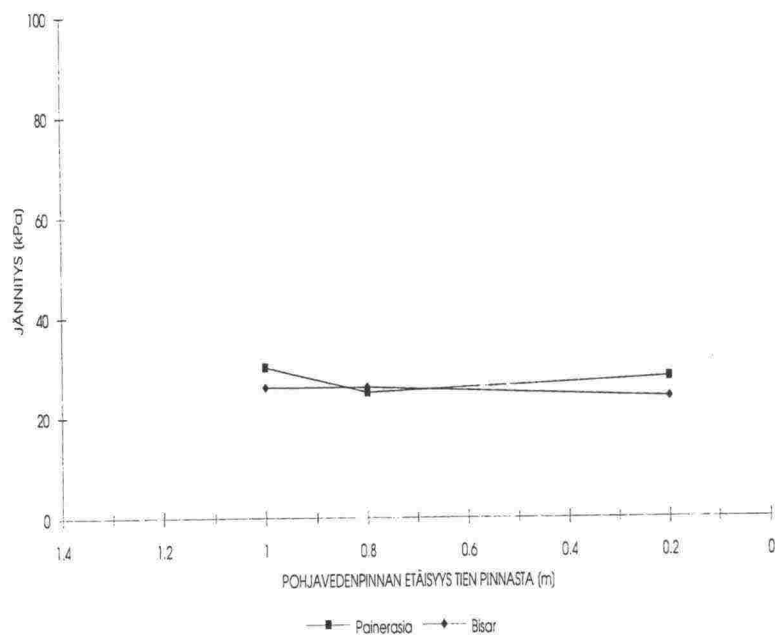


Liite 5. Virtaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu maaliskuun mittauksissa.

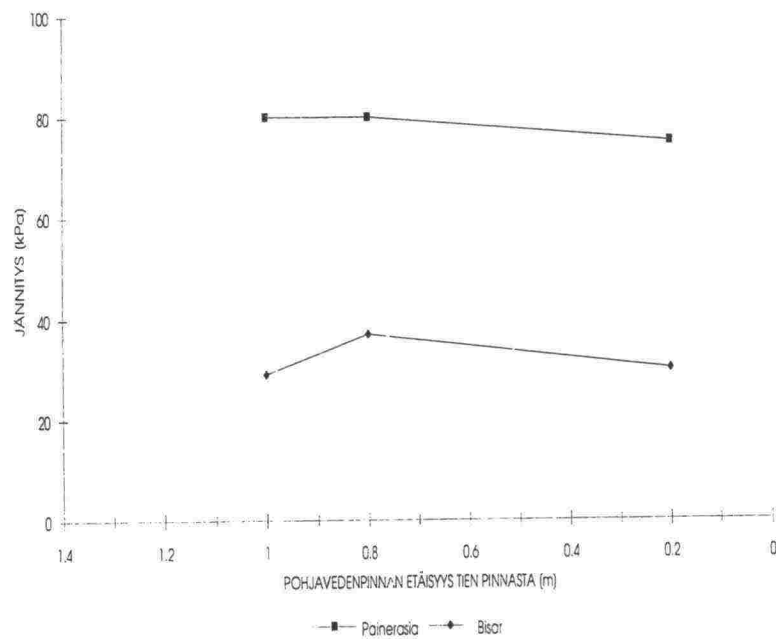


Liite 5. Virttaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu maaliskuun mittauksissa.

SITOMATTOMIEN KERROSTEN JÄNNITYKSET, RAKENNE L

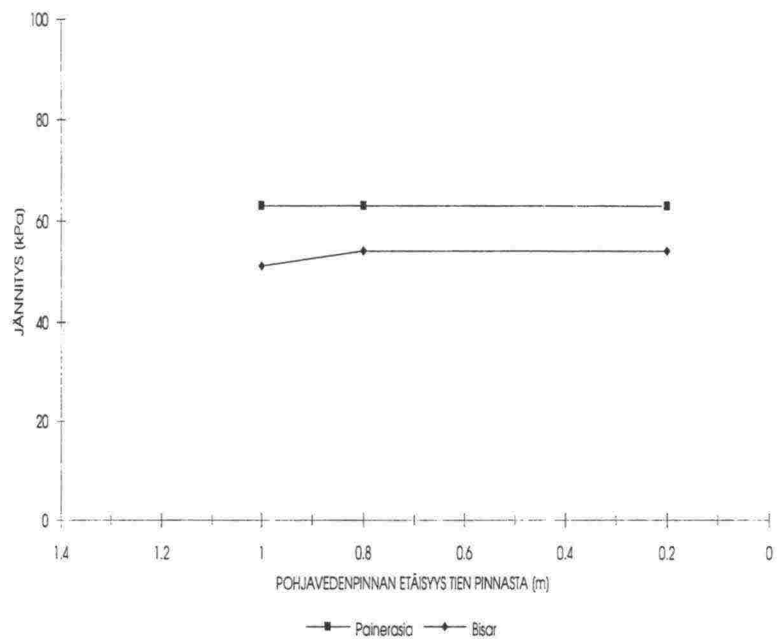


SITOMATTOMIEN KERROSTEN JÄNNITYKSET, RAKENNE M



Liite 5. Virtaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu maaliskuun mittauksissa.

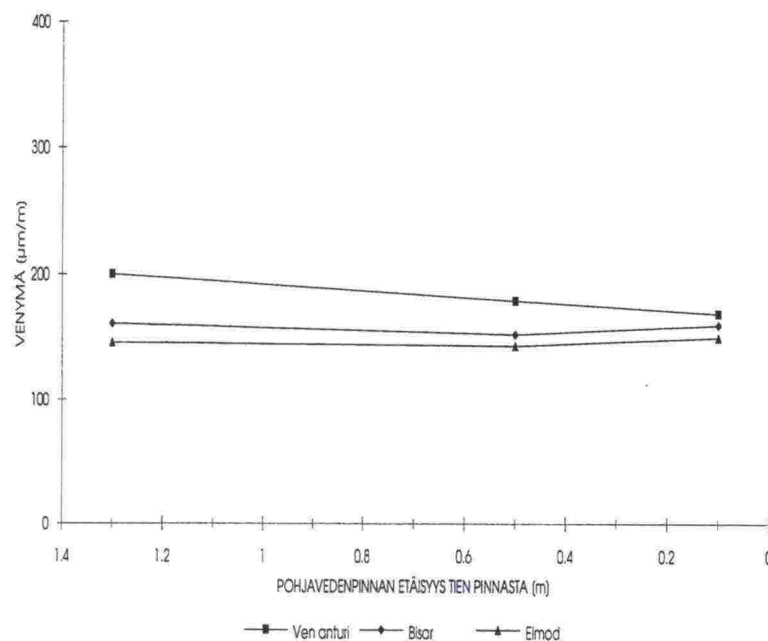
SITOMATTOMIEN KERROSTEN JÄNNITYKSET, RAKENNE N



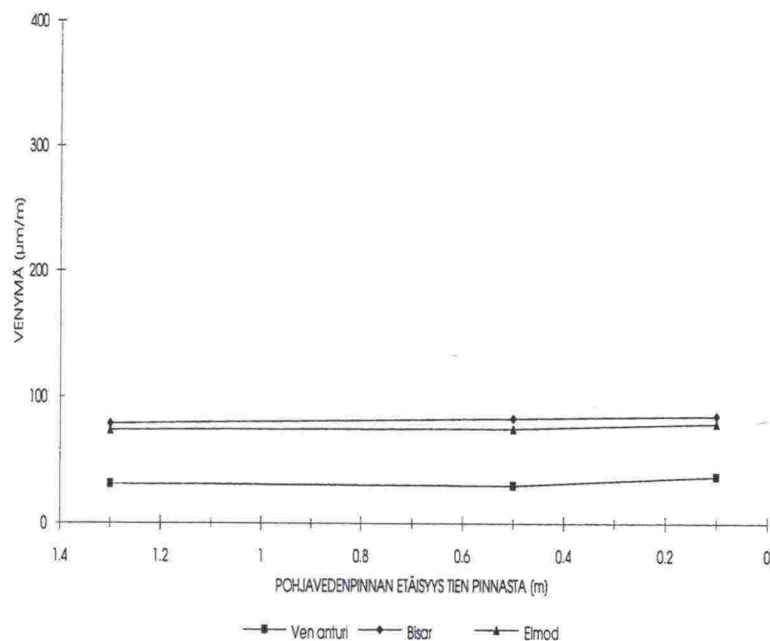
Liite 5. Virtaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu maaliskuun mittauksissa.



## SIDOTUN KERROKSEN ALAPINNAN VENYMÄT, RAKENNE L

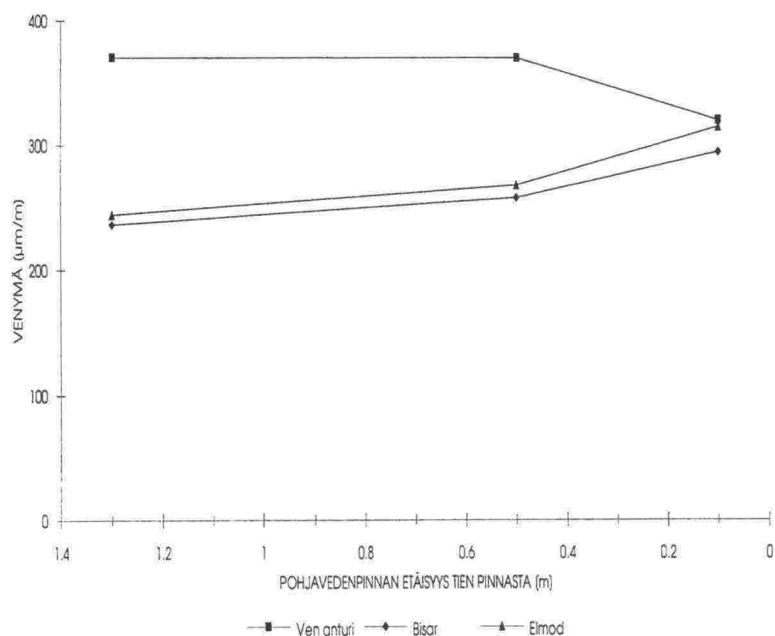


## SIDOTUN KERROKSEN ALAPINNAN VENYMÄT, RAKENNE M

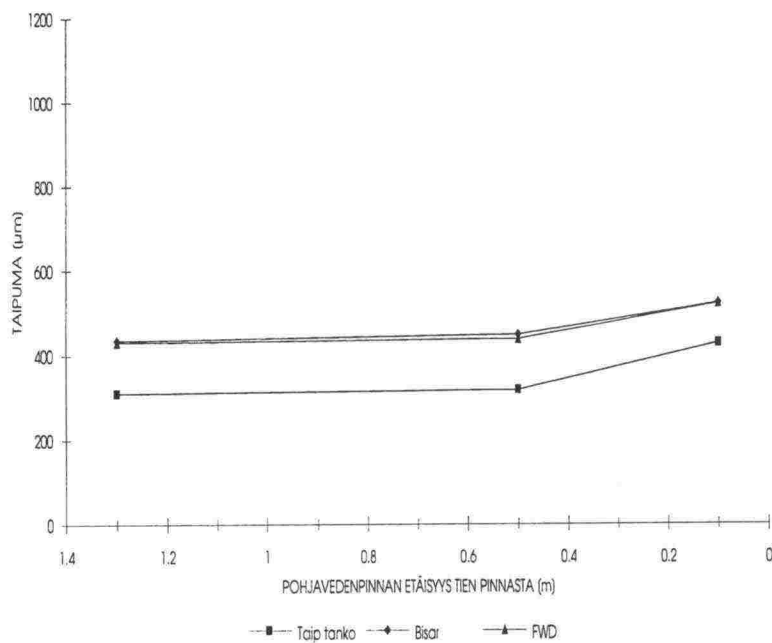


Liite 6. Virtaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu huhtikuun mittauksissa.

## SIDOTUN KERROKSEN ALAPINNAN VENYMÄT, RAKENNE N

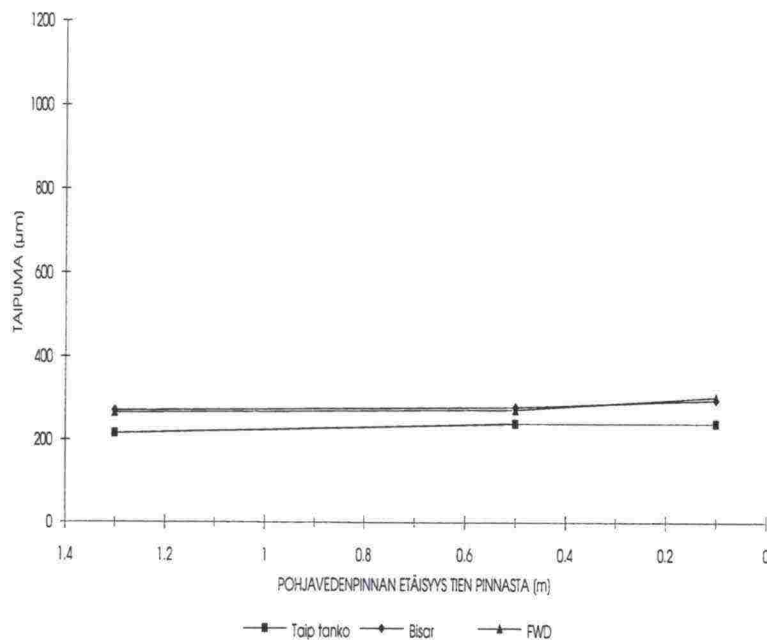


## RAKENTEIDEN TAIPUMAT, RAKENNE L

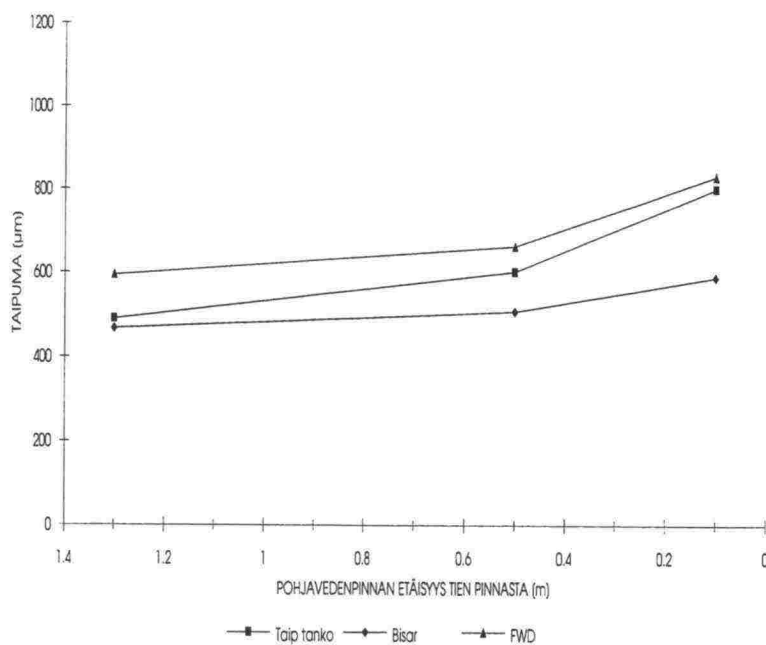


Liite 6. Virtaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu huhtikuun mittauksissa.

RAKENTEIDEN TAIPUMAT, RAKENNE M

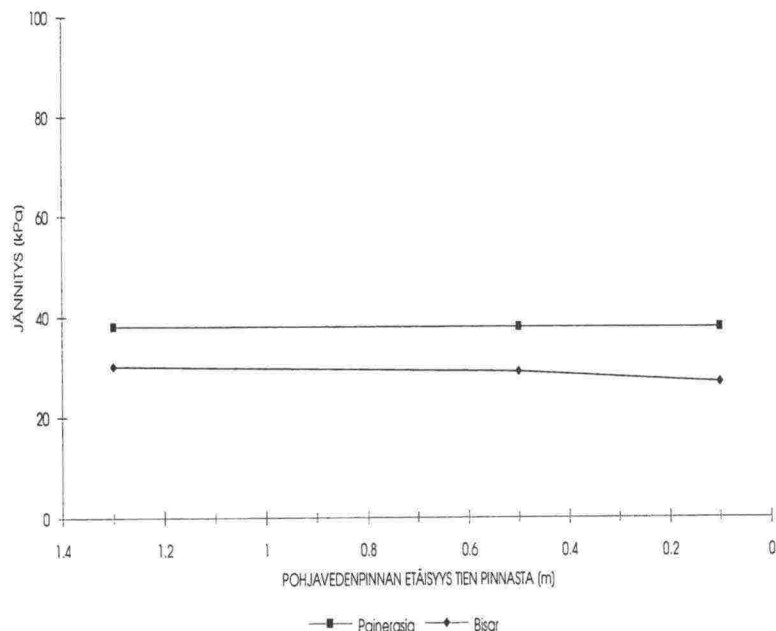


RAKENTEIDEN TAIPUMAT, RAKENNE N

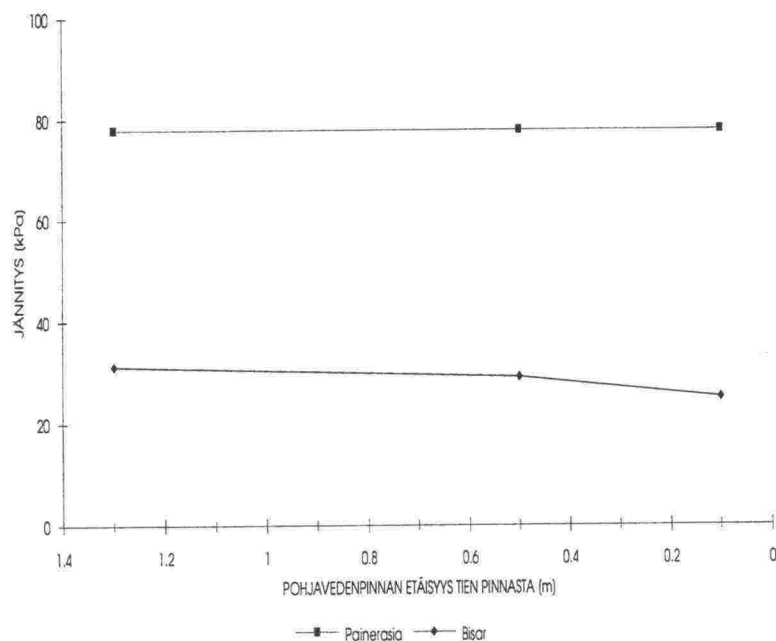


Liite 6. Virtaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu huhtikuun mittauksissa.

SITOMATTOMIEN KERROSTEN JÄNNITYKSET, RAKENNE L

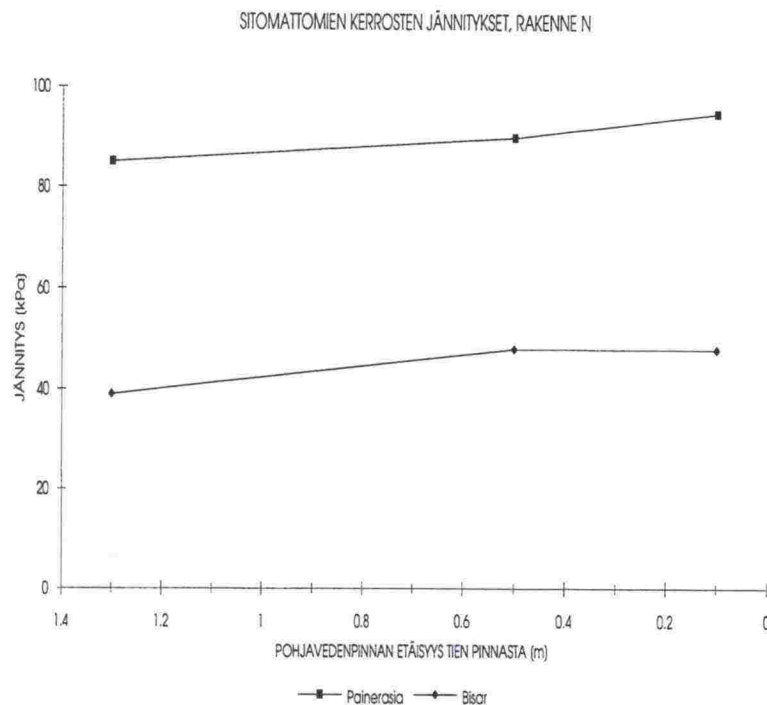


SITOMATTOMIEN KERROSTEN JÄNNITYKSET, RAKENNE M



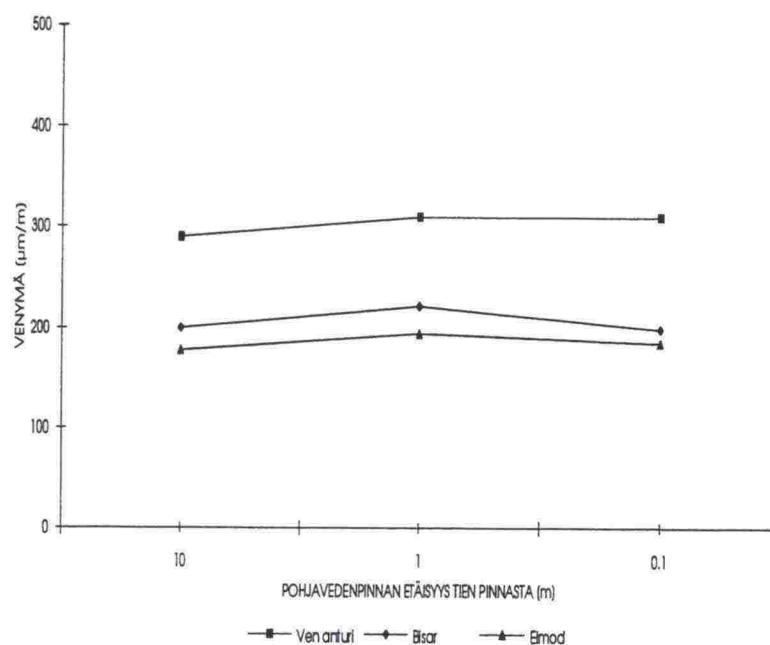
Liite 6. Virtaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu huhtikuun mittauksissa.



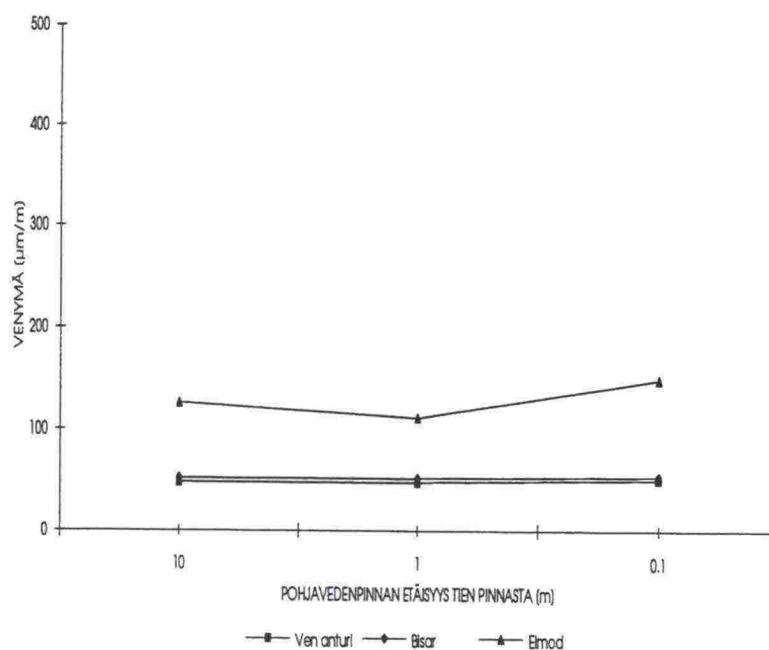


Liite 6. Virtaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu huhtikuun mittauksissa.

## SIDOTUN KERROKSEN ALAPINNAN VENYMÄT, RAKENNE L

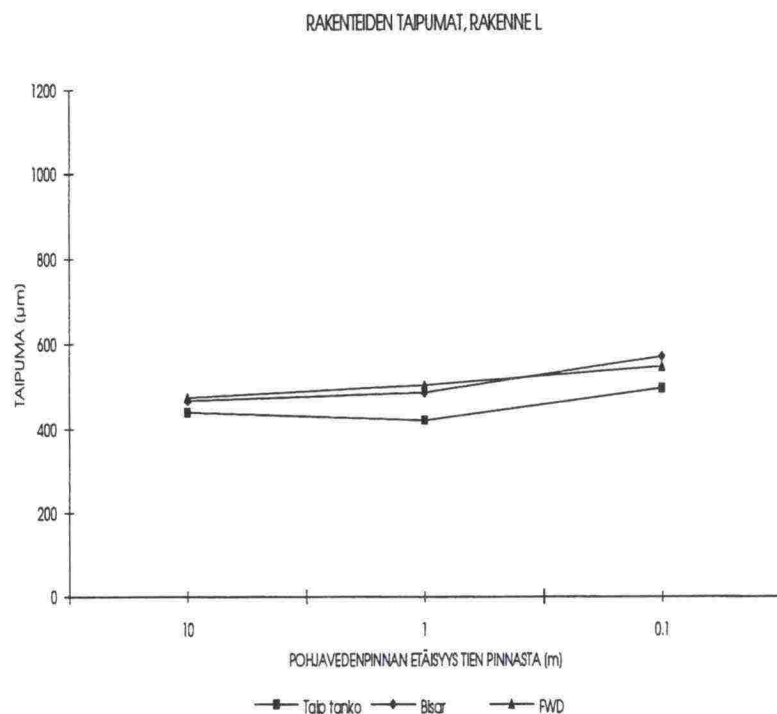
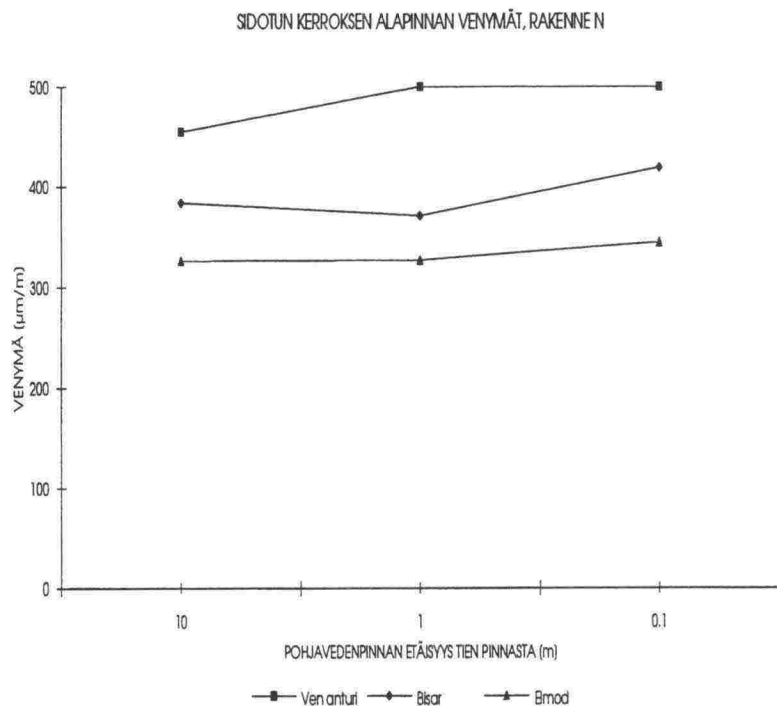


## SIDOTUN KERROKSEN ALAPINNAN VENYMÄT, RAKENNE M



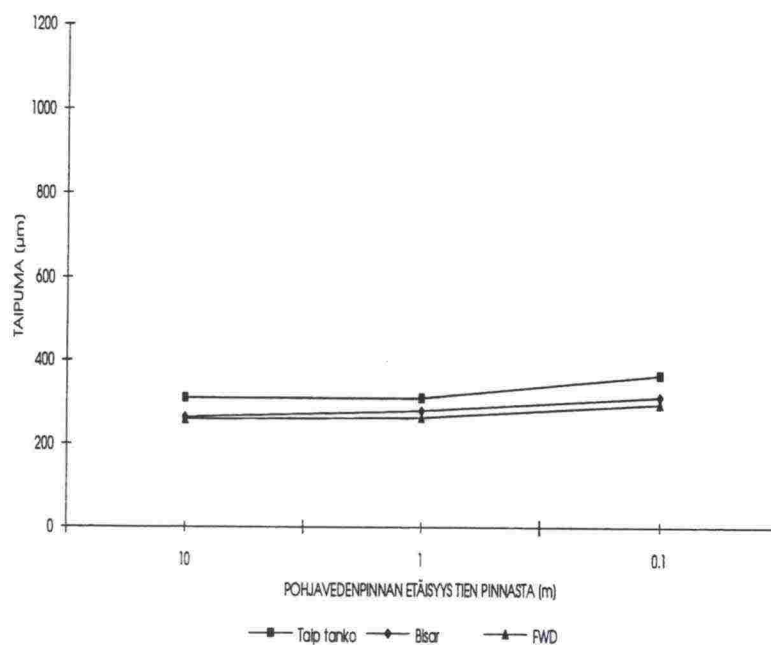
Liite 7. Virtaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu elokuun mittauksissa.

## LIITE 7/2

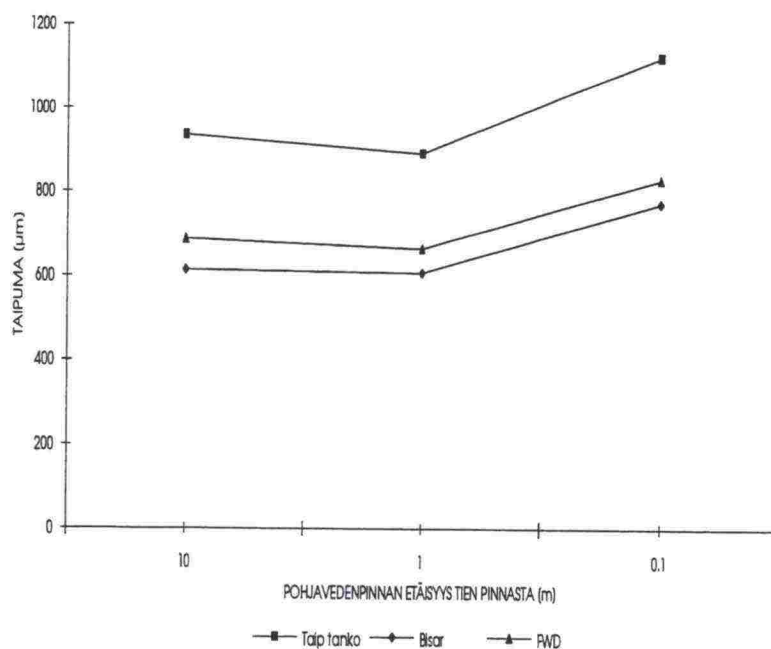


Liite 7. Virtaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu elokuun mittauksissa.

RAKENTEIDEN TAIPUMAT, RAKENNE M



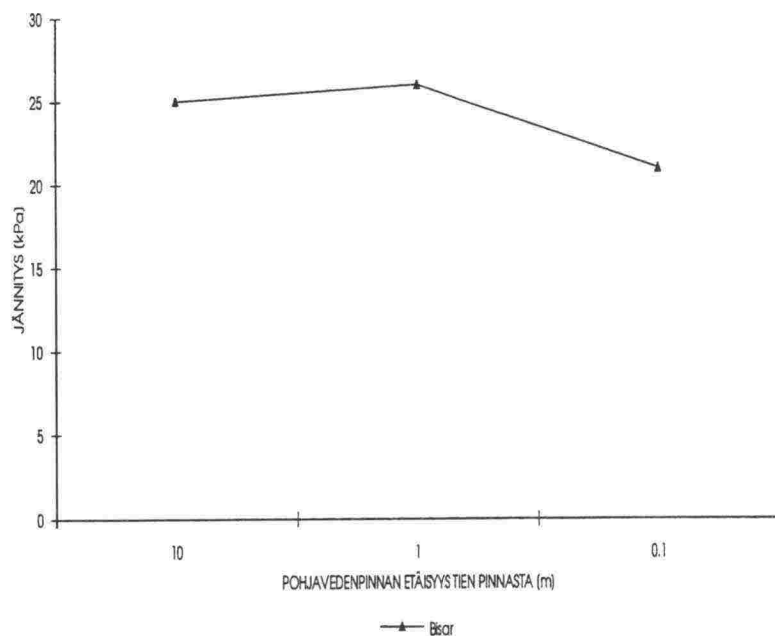
RAKENTEIDEN TAIPUMAT, RAKENNE N



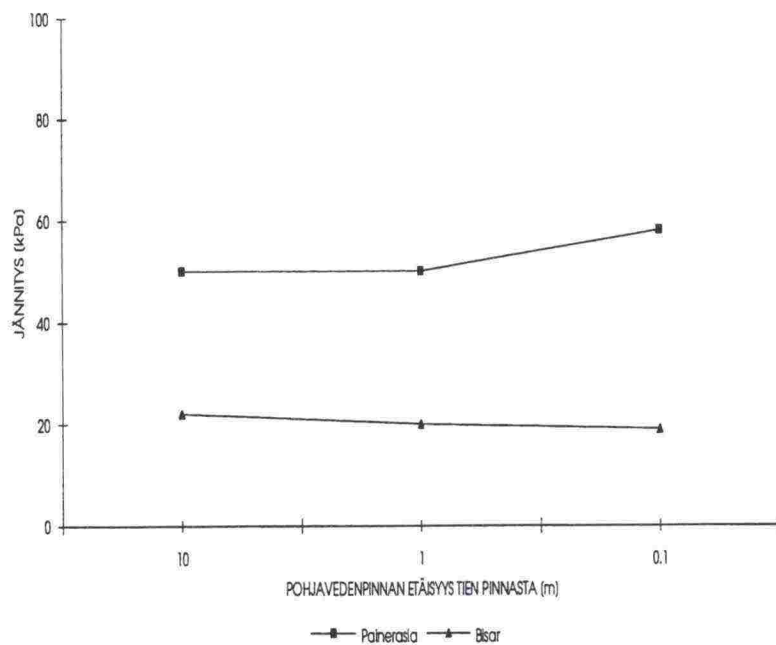
Liite 7. Virtaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu elokuun mittauksissa.



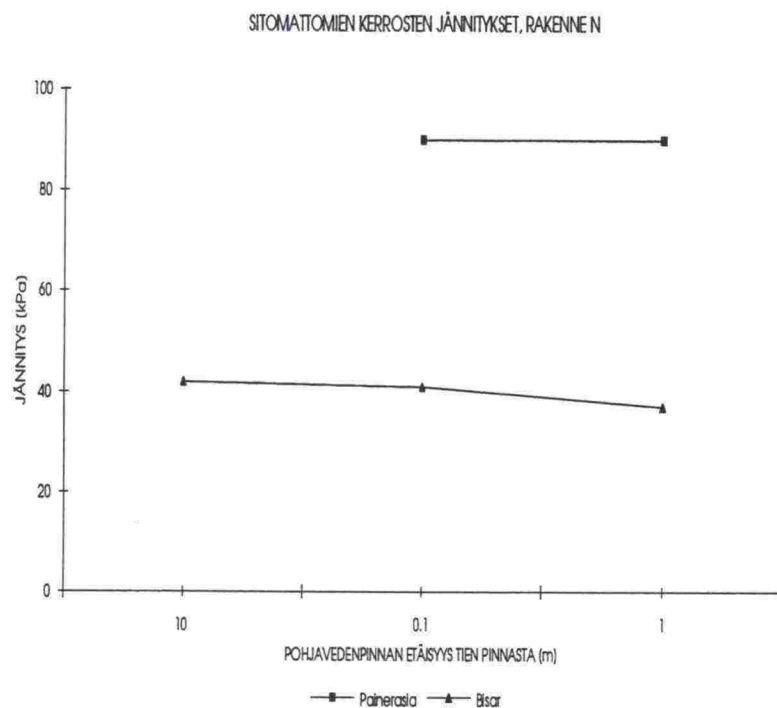
SITOMATTOMIEN KERROSTEN JÄNNITYKSET



SITOMATTOMIEN KERROSTEN JÄNNITYKSET, RAKENNE M



Liite 7. Virtaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu elokuun mittauksissa.



Liite 7. Virttaan koekenttä. Mitattujen ja laskettujen venymien, taipumien ja jännitysten vertailu elokuun mittauksissa.

## TIEHALLITUKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 5/1991 Massanvaihdon korvaaminen moreenitukiseinällä. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 6/1991 Havupuuhaake pengertäytteenä. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 13/1991 Teräsverkkojen asentaminen, käytännön ohjeita. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 16/1991 Asfalttimassan suhteitus Marshal-menetelmän mukaan. Geopalvelukeskus
- 17/1991 Murskeen muodonmuutosominaisuudet tien rakennekerroksissa. Geopalvelukeskus
- 23/1991 Betonipäällysteen seuranta; Raportti suunnittelusta ja rakentamisesta. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 32/1991 Moreenin käyttö tierakenteissa. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 39/1991 Koerakenteita turve- ja selttipehmeikölle. Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö
- 20/1992 Vanhojen tienrakennekerrosten uudelleen käyttö. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 26/1992 Kalliomurskeiden käyttö sitomattomissa rekennekerroksissa, esiselvitys. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 42/1992 Pehmeikölle perustettavan tiepenkereen geotekniset laskelmat. Geopalvelukeskus
- 43/1992 Pehmeikölle rakennettavien tieleikkausten geotekniset laskelmat. Geopalvelukeskus
- 44/1992 Saven varaan perustetut alikulkukäytävät. Geopalvelukeskus

## TIELAITOKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 32/1993 V-poikkileikkaus ja teräsverkot tierakenteissa; Tulokset V-poikkileikkauksen ja teräsverkkojen käyttökokeista tien pituussuuntaisten halkeamien ehkäisyssä. TIEL 4000043
- 48/1993 Geopalveluiden maksu- ja mittausperusteet; Geopalveluyksiköiden tuloslaskelmat. TIEL 4000049

## TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA

- 4/1992 Tiepenkereen holvautuminen, loppuraportti. TIEL 3100005
- 5/1993 Arktinen tienrakentaminen, Kilpisjärven hankkeen yhteenveto. TIEL 3100011

## TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 1/1992 Pystyjojanauhojen laatuvaatimukset; laadunvalvonta ja testausmenetelmät. TIEL 3200057
- 31/1992 Pohjaveden maatiivistesuojan tiivistäminen. TIEL 3200086
- 46/1992 Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. TIEL 3200099
- 62/1992 Hienoaineksen vaikutus stabiloidun moreenimurskeen pakkaskestävyyteen. TIEL 3200112
- 68/1992 Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma (TPPT), perussuunnitelma. TIEL 3200118
- 69/1992 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus. TIEL 3200119
- 78/1992 PTM-auton tuottamien tunnuslukujen käyttökelpoisuus ja vertailtavuus sekä niiden yhteys Laser-mittauksiin (IRI, IRI4, PI/Laser). TIEL 3200134

# TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

8/1993	Sitomattoman kantavan kerroksen rakentaminen. TIEL 3200135
15/1993	Masuunikuonan käyttö sitomattomissa päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200142
16/1993	Betonipäällysteen seuranta; Vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 1. TIEL 3200144
19/1993	Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. TIEL 3200145
20/1993	Moreeni ja sen käyttö. TIEL 3200146
26/1993	Bentoniittimattojen ja muovikavojen kelpoisuus pohjaveden suojaukseen, tutkimuksia ja suosituksia. TIEL 3200152
34/1993	Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, esitutkimus. TIEL 3200159
36/1993	Palaturpeen käyttö lämmöneristeenä, raportti koerakenteiden rakentamisesta. TIEL 3200161
38/1993	Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Kirjallisuusselvitys. TIEL 3200163
39/1993	Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Esiselvitysvaiheen kuormituskokeet. TIEL 3200164
40/1993	Teiden tasaisuusmittareiden vertailu; PTM:n, Roadmanin ja Dipstickin laitevertailu sekä epätasaisuuksien vaikutus tierasitukseen. TIEL 3200165
41/1993	Stabiloidun materiaalin maksimiraekoon sekä koekappaleen koon ja muodon vaikutus puristuslujuuteen. TIEL 3200166
47/1993	Väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten. TIEL 3200172
59/1993	Valtatien 3 routamitoitus routanousun mukaan välillä Riihimäki P - Virala. TIEL 3200184
60/1993	Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1991-1992; Pohjaveden pinnan vaikutus, tienpinnan taipumamittaus eri lämpötiloissa, vertailu standardi paripyörä - Neste Oy:n kantavuusradan pyörä. TIEL 3200185
68/1993	Kuitukankaat tienrakennuksessa; Uudistetun VTT-GEO luokituksen mukaiset laatuvaatimukset. TIEL 3200193
71/1993	Nonwoven Geotextiles in Road Constructions. TIEL 3200193E
76/1993	Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus 1992-1993. TIEL 3200200
77/1993	Moreenin jalostaminen. TIEL 3200201
81/1993	Vt 12 Veittostensuon syvästabilointi, tutkimusraportti. TIEL 3200205
82/1993	Emulsiopäällysteiden suunnittelu ja rakentaminen. TIEL 3200206
4/1994	Strategic Highway Research Program (SHRP) - Long-Term Pavement Performance (LTPP); Materiaalimodulin määrittäminen takaisinlaskentaohjelmalla sekä tierakenteen vaurioitumisajankohdan ennustemallit. TIEL 3200213
7/1994	Tien pohja- ja päällysrakenteet, tutkimusohjelma (TPPT). Tutkimusohjelma vuosille 1994-2000. TIEL 3200218
8/1994	Roudan vaikutusten mallintaminen. TIEL 3200219 <i>(Geotekniikan informaatiojulkaisuja:)</i>
2/1993	Massanvaihto. TIEL 3200127
21/1993	Pengerpaalutus. TIEL 3200147
23/1993	Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200149
24/1993	Tiegeotekniikan yleiset mitoituserusteet. TIEL 3200150